

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Jana KUBEČKOVÁ

**MAPOVÁNÍ VYBRANÝCH DRUHŮ HORNIN VRCHOLOVÝCH
PARTÍ KRKONOŠ S VYUŽITÍM LABORATORNÍ A OBRAZOVÉ
SPEKTROSKOPIE**

**LABORATORY AND IMAGE SPECTROSCOPY FOR MAPPING OF
SELECTED ROCKS IN PEAK AREAS OF THE KRKONOŠE MOUNTAINS**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Lucie Kupková, Ph.D.

Konzultant: Mgr. Karel Martínek, Ph.D.

Praha 2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 20. srpna 2013

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucí mé diplomové práce RNDr. Lucii Kupkové, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky k této diplomové práci. Dále bych chtěla poděkovat konzultantovi Mgr. Karlu Martínkovi, Ph.D. za rady při zpracování, Mgr. Elišce Žáčkové, Ph.D. a RNDr. Kryštofu Vernerovi, Ph.D. za pomoc při určení geologických vzorků a RNDr. Jiřímu Liškovi, CSc. za pomoc při určení lišejníků. Dále bych chtěla poděkovat kolegyni Bc. Kateřině Novotné za udělení nespočetných rad a v neposlední řadě bych chtěla poděkovat rodině a blízkým za podporu v průběhu celého studia.

Mapování vybraných druhů hornin vrcholových partií Krkonoš s využitím laboratorní a obrazové spektroskopie

Abstrakt

Tato práce se zabývá geologickým mapováním vrcholových partií Krkonoš. Byla hodnocena čtyři zájmová území – v západní části Krkonoš se jedná o oblast Vysokého kola a Harrachových kamenů a ve východní části se jedná o oblast Sněžky a oblast Kozích hřbetů. Hlavním zdrojem dat jsou letecká hyperspektrální data pořízená senzorem APEX, dále byla využita pozemní měření spekter kamenných moří a geologických výchozů a laboratorní měření spekter jednotlivých v terénu nasbíraných vzorků hornin a lišejníků. Praktická část je zaměřena na klasifikaci hornin a lišejníků ve vybraných oblastech pomocí čtyř klasifikačních metod: SAM, SID, MESMA a LSU. Součástí práce je také vytvoření unikátní spektrální knihovny pro sledované oblasti která obsahuje jak spektra čistých hornin, tak spektra hornin smíšených v různém poměru s lišejníky. Výstupem práce je porovnání přesnosti jednotlivých použitých klasifikačních metod, zhodnocení vlivu lišejníků na výsledky klasifikace, zmíněná spektrální knihovna a mapy výskytu klasifikovaných hornin v zájmových územích.

Klíčová slova: klasifikace, kamenná moře, hyperspektrální data, spektrální mísení, lišejníky, Krkonoše

Laboratory and image spectroscopy for mapping of selected rocks in peak areas of the Krkonoše Mountains

Abstract

This thesis deals with geological mapping of selected rocks in peak areas of the Krkonoše Mountains. Four areas of interest were situated in two parts of Krkonoše Mountains – on the west side it is the area of Vysoké kolo and Harrachovy kameny and on the east side there is the area of Sněžka and the area of Kozí hřbety. The main data were acquired by the hyperspectral sensor APEX. Ground spectral measurements of selected rocks and block fields were executed and the laboratory spectral measurements of geological samples and lichens were executed. Practical part aims at classification of rocks and lichens in selected areas using four classification methods: SAM, SID, MESMA and LSU. The spectral library is one of the outputs of this thesis. This spectral library contains the spectra of pure rocks and lichens and mixed spectra of rocks and lichens. The output of this thesis is the comparison of used classification methods, the analysis of spatial and geological accuracy and evaluation of lichens influence on the classification results, spectral library and maps of classified rocks occurrence.

Keywords: classification, block fields, hyperspectral data, spectral mixture, lichens, The Krkonoše Mountains

OBSAH

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK	7
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	8
1 ÚVOD.....	10
2 VSTUP DO PROBLEMATIKY	11
2.1 DPZ	11
2.1.1 Historie.....	11
2.1.2 Elektromagnetické záření	11
2.1.3 Elektromagnetické spektrum	12
2.2 Spektrální charakteristiky povrchu	13
2.2.1 Spektrální odrazivost.....	13
2.2.2 Spektrální odrazivost jednotlivých povrchů	14
2.3 Hyperspektrální data.....	16
2.3.1 Hyperspektrální senzory	17
3 LITERÁRNÍ REŠERŠE	18
3.1 Geologické studie	18
3.2 Vegetační studie	21
4 METODIKA	22
4.1 Charakteristika zájmové oblasti.....	22
4.1.1 Krkonoše	22
4.2 Data	27
4.2.1 Terénní data	27
4.2.2 Data skeneru APEX	29
4.3 Metody zpracování dat.....	29
4.3.1 Předzpracování obrazových dat	29
4.3.2 Předzpracování laboratorních a terénních spekter.....	33
4.3.3 Klasifikace obrazových dat	33
5 VÝSLEDKY.....	37
5.1 Oblast Sněžky	37
5.2 Oblast Vysokého kola.....	56
5.3 Oblast Harrachových kamenů	58
5.4 Oblast Kozích hřbetů	60
6 SHRnutí A DISKUZE.....	64
7 ZÁVĚR.....	67
ZDROJE	68
SEZNAM PŘÍLOH.....	72

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

APEX	Airborne Prism Experiment
ČGS	Česká Geologická Služba
DPZ	Dálkový Průzkum Země
GPS	Global Positioning System
IČ	Infračervený
KRNAP	Krkonošský Národní Park
LSU	Linear Spectral Unmixing
MESMA	Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis
MNF	Minimum Noise Fraction
MTMF	Mixture-Tuned Matched Filtering
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
PPI	Pixel Purity Index
RMS	Root Mean Square Error
SAM	Spectral Angle Mapper
SCM	Spectral Correlation Mapper
SFF	Spectral Feature Fitting
SID	Spectral Information Divergence
SMA	Spectral Mixture Analysis
SWIR	Short Wavelength Infrared
SVM	Support Vector Machine
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
UV	Ultrafialové
VNIR	Visible and Near-Infrared
WGS	World Geodetic System

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázky

Obr. 1: Elektromagnetická vlna	12
Obr. 2: Základní oblasti elektromagnetického spektra	12
Obr. 3: Spektrální odrazivost povrchů	14
Obr. 4: Spektrální odrazivost různých minerálů.....	15
Obr. 5: Senzor APEX.....	17
Obr. 6: Geologická mapa Krkonošského národního parku.....	24
Obr. 7: Mapa zonace Krkonošského národního parku.....	26
Obr. 8: Vybrané a zaměřené oblasti terénního průzkumu na podkladu geologické mapy Krkonoš	27
Obr. 9: Lokalita Vysokého Kola	28
Obr. 10: Lokalita východní Sněžky.....	28
Obr. 11: Rhizocarpon na granitu.....	29
Obr. 12: Různé druhy lišejníků na granitu	29
Obr. 13: Snímek a maska geologických objektů v oblasti Sněžky	31
Obr. 14: Snímek a maska geologických objektů v oblasti Vysokého kola	31
Obr. 15: Snímek a maska geologických objektů v oblasti Harrachových kamenů	31
Obr. 16: Snímek a maska geologických objektů v oblasti Kozích hřbetů	32
Obr. 17: Masky celého snímku v oblasti Vysokého Kola	32
Obr. 18: Smíšená spektra granitu a zeleného lišejníku	33
Obr. 19: Spektrální úhel mezi dvěma materiály a dvěma spektrálními kanály	34
Obr. 20: Klasifikace Sněžky za použití laboratorních spekter čistých hornin metodami SAM, MESMA, SID a LSU	39
Obr. 21: Klasifikace Sněžky za použití obrazových spekter čistých hornin metodami SAM, MESMA, SID a LSU	42
Obr. 22: Klasifikace Sněžky s použitím obrazových spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky metodami SAM, MESMA, SID a LSU	45
Obr. 23: Klasifikace Sněžky s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky metodami SAM, MESMA, SID a LSU	48
Obr. 24: Klasifikace Sněžky s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se všemi typy lišejníků metodami SAM, MESMA, SID a LSU	51

Obr. 25: Klasifikace Sněžky s použitím laboratorních spekter čistých hornin a spekter všech čistých lišejníků metodami SAM, MESMA, SID a LSU	53
Obr. 26: Klasifikace Sněžky s použitím laboratorních spekter zelených lišejníků metodami SAM, MESMA, SID a LSU	55

Tabulky

Tab. 1: Rozloha jednotlivých zón KRNAP (v ha) v jednotlivých okresech.....	26
Tab. 2: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter čistých hornin	37
Tab. 3: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím laboratorních spekter čistých hornin	38
Tab. 4: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím obrazových spekter čistých hornin	40
Tab. 5: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím obrazových spekter čistých hornin	40
Tab. 6: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím obrazových spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky	43
Tab. 7: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím obrazových spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky	44
Tab. 8: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky	47
Tab. 9: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky	47
Tab. 10: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se všemi typy lišejníků.....	49
Tab. 11: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se všemi typy lišejníků	50
Tab. 12: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter čistých hornin a spekter všech čistých lišejníků	52
Tab. 13: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím laboratorních spekter čistých hornin a spekter všech čistých lišejníků.....	52
Tab. 14: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter zelených lišejníků	54
Tab. 15: Přehled prostorových přesností vstupních spekter u všech oblastí.....	63

1 ÚVOD

Ačkoli k problematice geologického mapování pomocí hyperspektrálních dat existuje mnoho studií, v případě geologického mapování s použitím smíšených spekter hornin a různých druhů lišejníků je tomu právě naopak.

Cílem práce je zmapovat vybrané druhy hornin v Krkonošském národním parku s využitím laboratorní a obrazové spektroskopie. Ke klasifikaci bylo použito několik metod s cílem porovnat jejich přesnost. V rámci práce byl proveden terénní průzkum čtyř vybraných oblastí Krkonoš (oblast Sněžky, Vysokého kola, Harrachových kamenů a Kozích hřbetů), ve kterých byly nasbírány vzorky hornin a změřena jejich poloha pomocí GPS. V terénu a laboratoři byla změřena spektra vzorků spektrometrem ASD FieldSpec 4WR.

Jelikož je převážná část hornin porostlá do značné míry lišejníky, může tato skutečnost komplikovat klasifikaci hornin. Dalším cílem proto bylo zhodnotit vliv pokryvnosti hornin lišejníky na výsledky klasifikace. Za tímto účelem byl proveden experiment simulace míchání spekter hornin a různého množství lišejníku.

Dílčím cílem práce bylo také vytvořit unikátní spektrální knihovnu pro sledované oblasti, která obsahuje spektra jednotlivých druhů hornin a smíšená spektra hornin a lišejníků v různém poměru.

Výstupem práce jsou mapy zobrazující výskyt klasifikovaných hornin ve sledovaných územích a mapy zobrazující výskyt hornin pokrytých do různé míry lišejníky. Hlavní objektem zájmu byla oblast Sněžky. Výstupy z této oblasti jsou proto přímo uvedeny v práci podrobněji. Výstupy byly porovnány s geologickou mapou a byla zhodnocena prostorová přesnost klasifikace (množství vyklasifikovaných pixelů) použitých metod. Výsledky byly také zkontrolovány s geologem.

2 VSTUP DO PROBLEMATIKY

2.1 DPZ

Dálkový průzkum Země (angl. termín „*remote sensing*“) je založen na pozorování objektů na zemském povrchu nebo pozorování samotného povrchu. Toto pozorování je prováděno bez kontaktu s daným objektem.

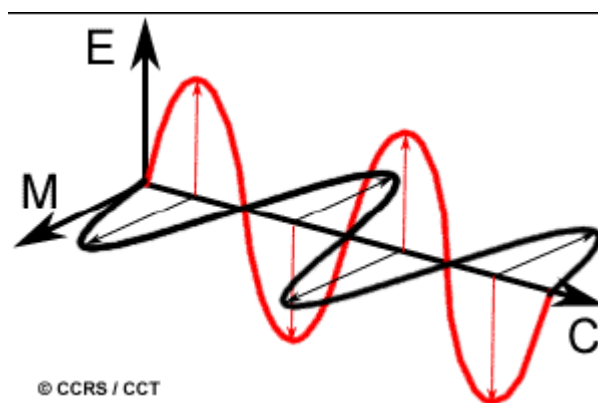
Pozorování zemského povrchu je prováděno pomocí elektromagnetického záření, přičemž data o uvedených objektech mohou být poskytována v obrazové podobě (snímky) nebo v neobrazové podobě (graf). Zařízení zaznamenávající intenzitu elektromagnetického záření, mohou být umístěna na různých typech nosičů – nejčastěji však na letadlech nebo družicích (Dobrovolný, 1998).

2.1.1 Historie

Pro vznik samotného DPZ bylo důležité objevení fotografie, jejíž vznik je zaznamenán v roce 1839. Roku 1858 byla pořízena první fotografie z výšky – francouzský vzduchoplavec pořídil fotografii z balónu z výšky asi 80 m. Mimo balónů bylo také v počátcích využíváno různých draků nebo také poštovních holubů. Krátce po vynálezu letadla (počátek 20. století) bylo letecké snímkování využíváno zejména k vojenským účelům. V padesátých letech bylo letecké snímkování využíváno pro civilní účely. V druhé polovině 50. let byla pořízena první fotografie zemského povrchu z kosmu. Postupem času začínají digitální obrazové záznamy postupně nahrazovat klasické fotografie (Dobrovolný, 1998).

2.1.2 Elektromagnetické záření

Pro získání informace o objektech na zemském povrchu je potřeba elektromagnetického záření, které vzniká pohybem nabitých částic. Elektromagnetické záření je kombinací vlnění elektrického (E) a magnetického pole (M), která jsou na sebe kolmá (obr. 1). Záření se šíří konstantní rychlostí, která se rovná rychlosti světla ve vakuu.

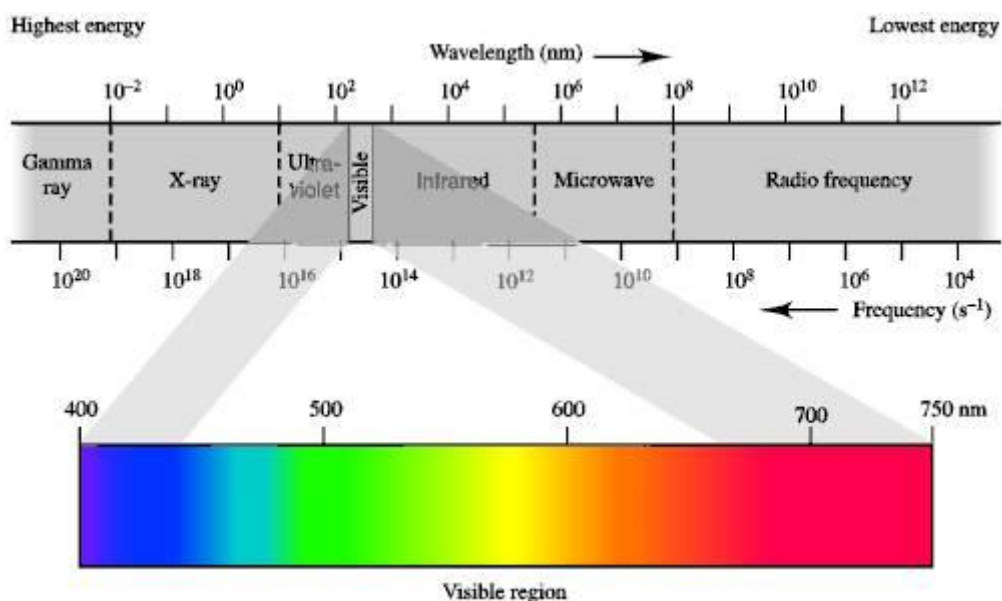


Obr.1: Elektromagnetická vlna. (Zdroj: Canada Centre for Remote Sensing)

Elektromagnetické záření je možno rozdělit na přírodní a umělé záření. Většina dnes používaných přístrojů měří přírodní záření, tzn. objektem emitované teplotní záření (vyzářené), nebo záření odražené. Jedná se o pasivní způsob měření, přičemž zdrojem přírodního elektromagnetického záření může být Slunce nebo Země. Jako aktivní způsob měření záření lze považovat umělý zdroj záření – ten je většinou umístěn na nosiči spolu s měřicí aparaturou, která zaznamenává intenzitu odraženého záření. Mezi měřené parametry elektromagnetického záření se řadí intenzita, vlnová délka, směr, rychlost, polarizace, koherence a fáze (Kolář, 1990).

2.1.3 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické záření se může v přírodě vyskytovat ve spojitém spektru s rozsahem přibližně 20 řádů. Podle vlnové délky je spektrum děleno do několika základních oblastí (obr. 2).



Obr. 2: Základní oblasti elektromagnetického spektra (Zdroj: [www. http://gislib.upol.cz](http://gislib.upol.cz))

V DPZ jsou využívány vlnové délky především viditelného, mikrovlnného, infračerveného a UV záření.

Ultrafialové záření (UV) dopadá na zemský povrch pouze z malé části. Tato část spektra je zajímavá především pro geologické aplikace, neboť mnoho minerálů vydává charakteristické záření právě v těchto vlnových délkách a lze je tedy proto snadněji identifikovat. Problémem je ale silné pohlcování UV záření atmosférou. UV záření dopadající na zemský povrch je pro živé organismy škodlivé (Dobrovolný, 1998).

Viditelné záření je jediné záření, které je lidské oko schopno zaznamenat. Zabírá jedno z největších atmosférických oken. Lze ho rozdělit na tři části – část červeného, zeleného a modrého světla. Pro jednotlivé aplikace se toto záření ovšem nejvíce jeví jako nevhodnější – např. jednotlivé horniny, minerály a ani půda neukazují odlišnost ve spektrálním chování v této části spektra (Dobrovolný, 1998).

Infračervené záření (IČ) je možno rozdělit na blízké IČ, střední IČ a tepelné záření. Blízké IČ záření je z důvodu menšího pohlcování atmosférou lépe využitelné např. k topografickým účelům. Tyto vlnové délky jsou důležité především pro studium vegetace v lesnictví nebo zemědělství. Střední IČ záření je důležité zejména pro geologické a vegetační studie. Toto záření zahrnuje dvě atmosférická okna se středy 1,5 a 2,2 mikrometrů. Právě druhé okno je oblastí, ve které má mnoho minerálů charakteristický absorpční pás. Tepelné záření je využíváno např. k zjišťování povrchové teploty oceánů nebo např. k lokalizaci lesních požárů apod (Dobrovolný, 1998).

Data mikrovlnného záření poskytují informace např. v geomorfologii, lesnictví i zemědělství. Pomocí aktivních mikrovlnných systémů je možno získat neobrazová data a informace o výškových poměrech a řadě meteorologických prvků (Dobrovolný, 1998).

2.2 Spektrální charakteristiky povrchu

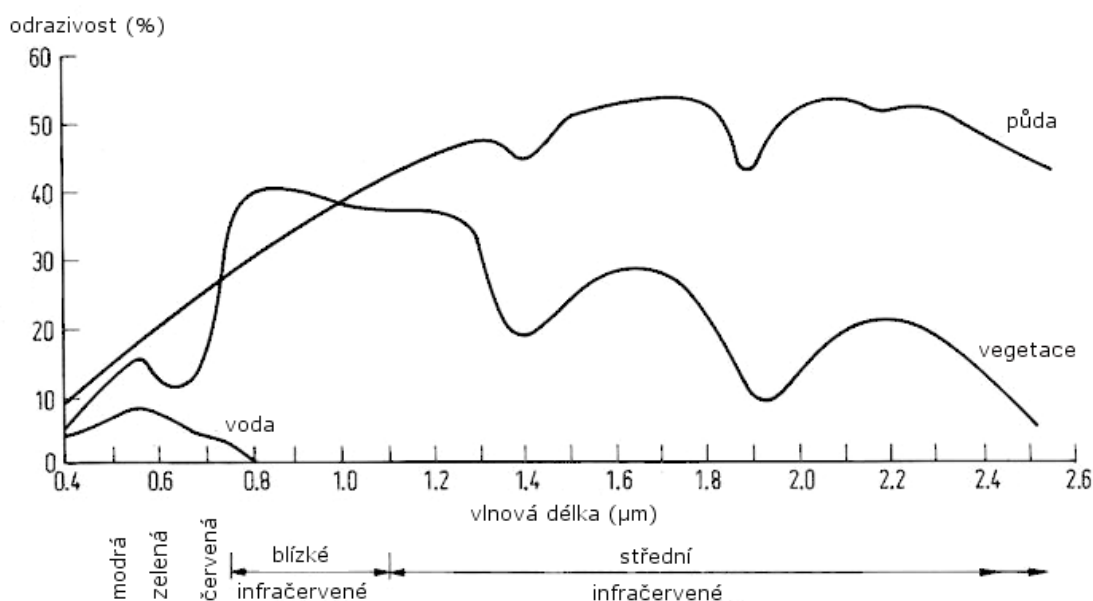
2.2.1 Spektrální odrazivost

Sluneční záření dopadající na zemský povrch je zčásti absorbováno, zčásti propuštěno a zčásti odraženo zpět do atmosféry. Množství odraženého záření lze charakterizovat jako tzv. spektrální odrazivost (reflektance) (Dobrovolný, 1998). Odrazivost udává intenzitu odraženého záření a intenzitu ozáření a mění se s vlnovou délkou (Kolář, 1990). Každý objekt je tedy charakteristický svou odrazivostí, která je ovlivněna složením a vlastnostmi daného objektu (např. teplota, minerální nebo chemické složení). Odrazivost daného objektu je vyjádřena tzv. spektrální křivkou odrazivosti, která je projevem spektrálního

chování daných objektů (Dobrovolný, 1998). Většina objektů má tedy typický průběh spektrální křivky odrazivosti. Díky této odrazivosti je možno určit, o jaký objekt se jedná.

2.2.2 Spektrální odrazivost jednotlivých povrchů

Protože je ale zemský povrch tvořen velkým množstvím různorodých objektů, je toto rozlišení velmi složité. Mezi základní typy povrchu, které ale určit lze, patří: vodní plochy, vegetace a holá půda – obecný průběh těchto typů povrchu je uveden v následujícím obrázku (obr. 3).



Obr.3: Spektrální odrazivost povrchů (Zdroj: Richards, 2006)

Voda

Voda je všudypřítomnou látkou v zemské krajině a vyskytuje se téměř při každém měření. Voda obsažená v krajině je v rámci DPZ pozorována jak ve stavu kapalném a pevném, tak i v plynném stavu. Spektrální vlastnosti vody jsou zcela odlišné od spektrálních projevů jiných látek. Voda obsažená v různých objektech tak mění i jejich spektrální projevy (Kolář, 1990).

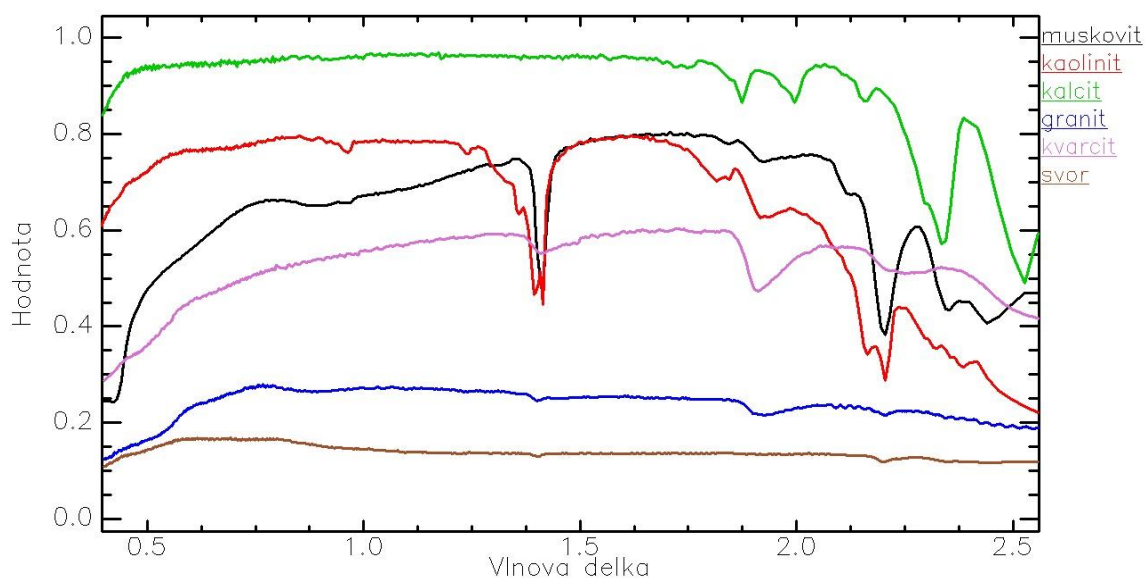
Půda

Z hlediska spektrálních vlastností je půda značně heterogenní povrch. Parametry ovlivňujícími odrazivost půdy jsou např. minerální složení, půdní vlhkost, obsah organických látek a textura půdního povrchu (Dobrovolný, 1998).

Horniny a minerály

Jednotlivé horniny se skládají z několika různých minerálů. Horniny, ale především minerály, jsou z hlediska chemického složení do značné míry homogenní. Spektrální projev hornin ale není tak jednoznačný jako spektrální projev jednotlivých minerálů (viz obr. 4) – ve spektrálních křivkách jednotlivých minerálů lze poměrně přesně lokalizovat absorpční pásy, které jsou způsobené jednotlivými chemickými prvky či sloučeninami, a také absorpční pásy způsobené přítomností vody. Výsledný tvar spektrální křivky je tedy výrazně ovlivňován těmito absorpčními pásy ve spektru minerálů a jejich rozmístění je závislé na chemickém složení a krystalické stavbě.

Vhodnými oblastmi spektra pro charakterizování odrazových vlastností jednotlivých hornin a především minerálů jsou střední infračervené vlnové délky a také oblasti termálního záření. Spektrální chování hornin ve viditelné a infračervené části spektra je určeno chemickým složením horniny (Dobrovolný, 1998). Důležitou složkou je přítomnost vody v minerálech a přítomnost křemíku v horninách, neboť čím větší množství křemíku hornina obsahuje, tím je hornina světlejší a tudíž se maximum posouvá ke kratším vlnovým délkám (Kolář, 1990). V oblasti termálního záření je pro jednotlivé druhy hornin charakteristická jejich tepelná kapacita. V oblasti mikrovln je vzhled snímků ovlivňován především dielektrickými vlastnostmi (Dobrovolný, 1998).



Obr. 4: Spektrální odrazivost různých minerálů (Zdroj: ENVI, usgs.sli, ign.crs.sli)

Vegetace

Vegetace se řadí mezi dominantní pokryv zemského povrchu. Spektrální projev porostu je tvořen nejen rostlinou - tvořenou kmenem, větvemi a listy, ale také půdou. Obecně platí, že spektrální křivky různých druhů vegetace jsou si podobny, přičemž jejich průběh lze rozdělit do tří oblastí:

- oblast pigmentační absorpce ($0,4 - 0,7 \mu\text{m}$) – tato oblast je ovlivňována pigmentačními látkami v listu – především chlorofylem
- Oblast vysoké odrazivosti ($0,7 - 1,3 \mu\text{m}$) je ovlivněna morfologickou strukturou listu.
- Oblast vodní absorpce ($1,3 - 3 \mu\text{m}$) je tvořena výraznými absorpčními pásy vody ve vlnových délkách $1,4 \mu\text{m}$, $1,9 \mu\text{m}$ a $2,7 \mu\text{m}$ (poslední zmiňovaný bývá označován jako hlavní vibrační absorpční pás vody).

Odrazivost vegetace je také výrazně ovlivněna množstvím vody, které rostlina obsahuje – spektrální odrazivost se zvyšuje s poklesem obsahu vody. Různě odlišnosti od normálního průběhu mohou být také způsobeny obsahem minerálů v půdě (rostliny dlouhodobě vystavené působení těžkých kovů mohou být postiženy nedostatkem chlorofylu) (Kolář, 1990).

V mnoha geologických výzkumech je velmi časté setkání s horninami porostlými různými druhy lišejníků. Lišejníky patří k organismům, se kterými se především geologové setkávají nejčastěji. V průběhu let byl zaznamenán vztah mezi určitými typy hornin a odpovídajícími druhy lišejníků. Bylo zjištěno, že nahromadění stopových prvků u mechorostů a lišejníků je obvykle mnohem vyšší než u jiných druhů rostlin – lišejníky jsou také velmi citlivé na oxid siřičitý a díky jejich absorpci těžkých kovů z ovzduší, slouží jako efektivní ukazatel znečištění ovzduší (Easton, 1994).

2.3 Hyperspektrální data

K nejčastěji využívaným typům dat v DPZ patří multispektrální a hyperspektrální data. Rozdíl mezi multispektrálními a hyperspektrálními daty je v počtu a šířce jednotlivých spektrálních kanálů. Multispektrální snímky obsahují několik - maximálně desítek spektrálních kanálů, přičemž jednotlivé intervaly vlnových délek většinou odpovídají určitým barvám viditelného spektra. Oproti tomu hyperspektrální snímky obsahují těchto kanálů desítky až stovky, přičemž jsou tato pásma velmi úzká, navazují na sebe a zobrazení spektrálních křivek odrazivosti pro jednotlivé materiály se pak jeví téměř spojitě (Smith, 2012).

2.3.1 Hyperspektrální senzory

V poslední době patří hyperspektrální data k nejvíce rozvíjenému oboru v oblasti DPZ. Tato data začínají pomalu nahrazovat data multispektrální, která nesou podstatně méně informace. Jak již bylo zmíněno, hyperspektrální senzory snímají zemský povrch ve velkém počtu úzkých spektrálních pásem. Obrazové spektrometry si lze představit spíše jako skener, který snímá území v jednotlivých řádcích, nikoliv jako kameru, která snímá území jako celek. Spektrometr může být umístěn buď v letadle – pak se jedná o letecký spektrometr, nebo na družici – pak se jedná o družicový spektrometr. V neposlední řadě je nutno také zmínit existenci pozemního spektrometru, pomocí něhož lze snímat data při terénním výzkumu (Málková, 2010).

Mezi nejpoužívanější senzory lze zařadit senzor Hyperion. Tento senzor je umístěn na družici EO-1, jejímž vlastníkem je NASA. Tento senzor je prozatím jediným komerčním hyperspektrálním senzorem, který pořizuje snímky ve 242 spektrálních kanálech. Data jsou snímána za pomoci dvou spektrometrů – jedním ve viditelném záření a druhým v krátkém infračerveném záření. Díky senzoru Hyperion je možno charakterizovat zemský povrch a díky velkému počtu spektrálních pásem je možno hodnotit a klasifikovat komplexní ekosystémy se značnou přesností. Snímky ČR z tohoto senzoru jsou volně ke stažení v archivu USGS, byť není daty ze senzoru Hyperion příliš pokryta (Arcdata Praha, 2012).

V této práci budou použita data ze senzoru APEX (obr. 5). APEX (Airborne Prism Experiment) je zobrazovací spektrometr vyvinut ESA, který pořizuje data ve 300 spektrálních pásmech v rozmezí vlnových délek 400 nm – 2500 nm s prostorovým rozlišením od 2 m do 5 m. Ve viditelném záření pořizuje data ve 114 spektrálních kanálech a v krátkých vlnových délkách se vyskytuje 199 spektrálních pásem (APEX, 2012).



Obr. 5: Senzor APEX (Zdroj: APEX, 2012)

3 LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 Geologické studie

Hyperspektrální data jsou především využívána k vegetačním a geologickým výzkumům.

Přehled aplikací multispektrálních a hyperspektrálních dat v geologii zpracovali ve své práci Van der Meer, et al. (2012). Představili nejpoužívanější nástroje užívané pro geologické mapování – spectral angle mapper (SAM), spectral feature fitting (SFF), support vector machines (SVM) a spectral unmixing.

Porovnáním různých klasifikačních algoritmů se ve své studii zabýval J. H. Lumme (2004). Jeho zájmová oblast se nacházela v jižním Finsku a zahrnovala celkem sedm odlišných vegetačních a půdních typů. Pro porovnání použil klasifikační algoritmy Spectral Angle Mapper (SAM), Spectral Correlation Mapper (SCM) a Spectral Unmixing. Kromě těchto algoritmů použil také klasifikační algoritmy používané především ke klasifikacím multispektrálních snímků – klasifikátor Minimum Distance nebo např. Maximum Likelihood. Po porovnání všech klasifikátorů bylo zjištěno, že SAM a SCM vykazují lepší výsledky a jsou méně časově náročnější než zbylé klasifikátory.

Metodu Linear Spectral Unmixing použil také Hubbard, et. al. (2005) ve své studii, kde se zaměřili na geologické mapování v Chile a Bolívii pomocí snímků ze senzorů ASTER a Hyperion. Jako vhodnější se jim ale jevil algoritmus SAM, který je velmi vhodný pro jemné rozdíly mezi materiály. Nicméně, jejich studované území bylo také vegetačně velmi rozmanité, proto navrhli do budoucna použít metodu navrhovanou Robertsem, et al. (1996) – tzv. multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA). Tato metoda používá spektra jako lineární kombinace čistých spekter, přičemž druhy a počet tzv. endmembers je možno odlišit pro každý pixel a tím minimalizovat RMS.

Geologickým mapováním se ve své diplomové práci zabýval Metelka, který se zabýval geologickou interpretací dat dálkového průzkumu Země v oblasti Gobijského Altaje. V této práci se zaměřil na interpretaci prostorového rozložení litologických jednotek. Využil dat senzorů Landsat 7ETM+ a ASTER. Jednotlivé spektrálně odlišné horninové komplexy byly následně identifikovány pomocí technik úpravy obrazu a také pomocí metod řízené a neřízené klasifikace v převážně blízkých infračervených pásmech. Pro strukturní interpretaci oblasti byla použita upravená data ze senzoru Landsat a digitální model reliéfu. Výstupem byla geologická mapa určená pro geology pracující v neznámém terénu (Metelka, 2005).

Geologickým mapováním v horském terénu se zabývali také W.-S. Chang a C.-C. Liu, kteří se zaměřili na geologické mapování pohoří Taiwanu s využitím hyperspektrálních snímků. Zaměřili se také na mapování geologických výchozů. Pro jejich práci byl použit senzor Hyperion. Byly provedeny atmosférické korekce a pozemní měření. Jelikož v předchozích studiích bylo zjištěno, že spektrální knihovny, které byly dříve vytvořeny různými výzkumnými ústavy, nejsou plně srovnatelné s měřením odrazivosti v dané oblasti, byl tento problém vyřešen tak, že bylo několik vzorků převezeno do laboratoře a tam byla změřena jejich spektrální odrazivost. Dalším problémem bylo pokrytí oblasti hustou a v místech výchozů řídkou vegetací. Tento problém byl vyřešen experimentem, který zahrnoval simulované hyperspektrální snímky, kdy byla vybrána spektra různých povrchů a smíchána v různých kontrolovaných podmínkách. Pro zjištění čistých pixelů byla použita MNF Transformace. Následně byla použita SAM klasifikace. Pro litologické mapování byl použit Mixture-Tuned Matched Filtering (MTMF). Následně byly tyto snímky porovnány s „nesimulovanými“ a porovnány se stávající geologickou mapou měřítka 1:500 000. Díky tomu byla zjištěna geologická skladba jednotlivých zkoumaných lokalit, a také bylo zjištěno, že výchozy je možno identifikovat, a že rozložení hornin odpovídá stávající geologické mapě. (Chang, Liu, 2005).

Podobným tématem se ve své studii zabývali také autoři Singh a Mukherjee. Tato studie je zaměřena na studium horninového prostředí v semi-aridním a skalnatém terénu. S využitím družicových hyperspektrálních dat, topografické analýzy a 3D vizualizačních technik byly odvozeny hydrologické režimy ve formě GIS výstupů, sloužící k získání přehledu vodních zdrojů v regionu a pro následné plánování řízení vodních zdrojů (Singh, Mukherjee, 2011).

Lépe porozumět geologickým procesům v Death Valley a vytvořit detailní geologickou mapu se snažili autoři Kruse, et. al. (1993). Ve studii orientované na Northern Death Valley v Kalifornii se zaměřili jak na obvyklé geologické mapování, tak i na laboratorní spektroskopii. Nejprve byly pomocí zobrazení v nepravých barvách odlišeny hlavní minerály. Poté byly použity tzv. Binary encoding, což je jednoduchá a běžně používaná metoda, kdy se pro každé spektrum vypočte průměr a určí se, zda pixel v daném spektru leží nad a nebo pod průměrem. Spektrum je tedy uloženo jako celočíselná hodnota a je-li hodnota pixelu vyšší nebo rovna průměru, je nastaven na hodnotu 1, pokud je nižší než průměr, dostane hodnotu 0. Binární kódování je rychlá a přesná metoda pro identifikaci minerálů s výraznou absorpcí. Protože se ale povrch neskládá pouze z čistých jednoduchých pixelů, bylo také použito metody spectral unmixing (Kruse et. al., 1993).

Ve studii zabývající se ověřením algoritmu SAM pro geologické mapování v Maroku se Girouard, et. al. (2004) zaměřili na srovnání výsledků tohoto algoritmu mezi dvěma senzory - Quickbird a Landsat-TM. Zjistili, že i přes horší spektrální rozlišení poskytuje Landsat-TM lepší výsledky, než Quickbird. Na druhou stranu připustili, že je to způsobené absencí pásma SWIR u Quickbirdu, které je důležité právě pro mineralogické mapování.

Na geologické mapování v horských oblastech (konkrétně v okolí Etny) se také zaměřili Amici, et. al. (2011). Ve své práci použili ke klasifikaci hyperspektrálních (senzor EO1-Hyperion) a multispektrálních dat (senzor ASTER) klasifikátor Support vector machine. Výsledky klasifikátoru porovnali s geologickou mapou a bylo dosaženo velmi dobrých výsledků – u senzoru Hyperion se přesnost pohybovala kolem 94 % a u senzoru ASTER byla přesnost stanovena na 97 %.

Geologickým mapováním v oblasti Kalifornie se zabývali také McHugh, et. al. (2003), kteří ke klasifikaci hyperspektrálních snímků ze senzoru AVIRIS použili tři metody klasifikace obrazu. Metodu SAM, dále pro určení čistých pixelů v obraze použili metodu Pixel Purity Index (PPI), kterou aplikovali na data, ve kterých byl již odstraněn šum pomocí MNF transformace (Minimum Noise Fraction). Dále využili metodu Spectral Linear Unmixing. Bylo zjištěno, že metoda PPI oproti SAM klasifikátoru vyklasifikuje pouze velmi malé plochy.

V rámci České republiky byl zahájen geologický výzkum v roce 2007, kdy byla navázána spolupráce mezi pracovišti DPZ České geologické služby a francouzské geologické služby (BRGM). Tato spolupráce byla zaměřena na geologické aplikace spektrometrie a analýzu hyperspektrálních dat. Jejím cílem bylo vytvoření spektrálních knihoven horninových povrchů Sokolovské pánve a jejich následné využití pro klasifikaci satelitních dat a plošné vymezení míst povrchové acidifikace. Studie ukázala, že půdy v již opuštěných lomech jsou často velmi kyselé a že kyselý zvětralinový substrát, který vzniká v místech aktivní i bývalé povrchové těžby, může být identifikován pomocí spektrálních charakteristik. Dále také bylo zjištěno, že lze ve směsném materiálu detekovat a plošně vymezit přítomnou organickou hmotu. S pomocí spektrálních knihoven vytvořených zpracováním pozemních spektrálních měření je prostřednictvím hyperspektrálních obrazových dat možné (v místech nezakrytých vegetací) sledovat geologické složení povrchu, resp. relativní zastoupení dílčích minerálů a dalších složek (pomocí metody tzv. spektrálního unmixingu). Bylo také zjištěno, že laboratorním zpracováním odebraných vzorků (tzn. např. určení obsahu listových pigmentů – chlorofylu a karotenoidů, určení obsahu těžkých kovů a stopových prvků v jehlicích a listech vegetace, resp. v odebraných vzorcích půdy) je možné zkonstruovat statistický model,

který popisuje vzájemnou korelaci spektrálních charakteristik vegetace s biofyzikálními a biochemickými ukazateli zdravotního stavu vegetace a geochemickým složením půdního substrátu. (Kopačková et. al., 2009).

3.2 Vegetační studie

Jak bylo již výše zmíněno, lišejníky patří mezi nejčastější organismy, se kterými se geologové ve svých výzkumech setkávají. Pro geologické mapování je ale nejprve nutné tyto lišejníky od původních hornin odlišit.

Spektrální odrazivostí lišejníků se zabývali Rees et. al. (2004). Zaměřili se na lišejníky v severním Švédsku a popsali jejich společné vlastnosti a hlavní rozdíly. Mezi společné vlastnosti lišejníků patří např. nízká odrazivost ve všech vlnových délkách u hnědých lišejníků. U šedých lišejníků se projevila vyšší absorpce okolo hodnoty 650 nm a u zelených lišejníků poměrně vysoká odrazivost.

Vlivem kůrovitých a lupenitých lišejníků na odrazivost hornin se zabývali Bechtel, et. al. (2002), kteří zkoumali propustnost světla přes lišejníky *Umbilicaria torrefacta*. Bylo zjištěno že lišejníky mají opravdu vliv na výsledné spektrum horniny. Pixely obrazu jsou skutečně mixovány spektrem jednotlivých lišejníků vyskytujících se na horninách a jejich odmixování je možno za použití čistého spektra lišejníku.

Laboratorními experimenty byl zkoumán vliv povětrnostních podmínek a pokrytí žulových hornin lišejníkem na spektrální odrazivost žulových hornin ve viditelném a infračerveném pásmu. Zatímco odrazivost horniny se měnila s povětrnostními podmínkami i s měnícím se druhem horniny, všechna spektra čtyř různých druhů lišejníků vykazovala stejné absorpční vlastnosti. V jakémkoli spektru, které obsahovalo lišejník, lze pozorovat změny, které jsou způsobeny přítomností lišejníku (Rollin, et. al., 1994).

Vztahem mezi lišejníky a horninami se zabývali Zhang, et. al (2005). Jelikož lišejník ohrožuje mapování minerálů, rozhodli se použít lišejník jako tzv. endmember (koncový člen) při spektrální analýze (SMA). Určit lišejník jako endmember není ale z obrazu jednoduché. Použili metodu spectral unmixing a zjistili, že odmixování lišejníku a horniny může být úspěšně provedeno pomocí jednoho koncového členu lišejníku v krátkých (SWIR) vlnových délkách.

4 METODIKA

4.1 Charakteristika zájmové oblasti

4.1.1 Krkonoše

Krkonoše se rozkládají v severní části České republiky v zeměpisné délce 50° severní šířky. Díky svahům vyčnívajícím nad alpínskou hranici lesa tvoří mohutnou hradbu nad rozlehlými nížinami Polska a Německa. Jejich hřbety jsou uspořádány ve směru severozápad – jihovýchod v přibližné délce 35 km. Díky své poloze jsou jedním z nejvýznamnějších center geobiodiverzity České republiky (Správa KRNP, 2010).

Geomorfologie

Krkonoše tvoří jednu z hlavních stavebních jednotek Západních Sudet. Podélná osa Krkonoš probíhá ve směru SZ-JV v celkové délce 36 km, přičemž na západě jsou Krkonoše odděleny od Jizerských hor Novosvětským sedlem a na východě jsou Krkonoše odděleny od Sudetského mezihoří Libavským sedlem. Krkonoše jsou děleny na dvě základní horopisné jednotky – k první patří dva téměř rovnoběžné hřbety – vyšší vnější hřbet, který kopíruje státní hranici bývá označován jako hřbet hlavní nebo slezský. Nižší vnitřní hřbet je označován jako vedlejší nebo také český. Oba hřbety jsou odděleny údolím Malého a Bílého Labe a Mumlavy a na Pančavské louce spolu oba hřbety splývají. Ke druhé jednotce se řadí dlouhé a široké rozsochy vybíhající od vnitřního hřbetu na jih – mezi nejznámější patří Vlčí hřbet a Černá hora (Demek, 1965).

Obě části pohoří mají velmi odlišný průběh. Vnější pohraniční hřbet je nejvyšší a je výrazný svým širokým a plochým zarovnaným povrchem ve výšce 1300 – 1500 m n. m. Z této plošiny vystupují útvary z odolnějších hornin – Sněžka, Malý Šišák, Vysoké kolo, Violík a Sokolník. Nižší vnitřní hřbet je tvořen převážně příkrými svahy a přechází místy v hřeben. Vznikl v oblasti kontaktně zpevněného jižního okraje krkonošského žulového masívu. Jeho souvislý průběh byl severně od Špindlerova Mlýna přerušen zpětnou erozí Labe. Mezi jeho nejvýraznější části jsou řazeny Kozí hřbety (Demek, 1965).

Druhá část Krkonoš – horské rozsochy jsou tvořeny ze širokých zalesněných hřbetů převážně v S-J směru. Jejich vrcholové části jsou ploché, jižní svahy jsou příkré a místy přecházejí ve zlom. Hřbety jsou odděleny hlubokými údolními horských potoků.

Nejdůležitějším obdobím ve vývoji Krkonoš jsou mladokaledonské orogenetické pohyby, při nichž vzniklo v SZ-JV směru nové horstvo, jehož základní charakteristické rysy jsou patrné až dodnes. Tyto rysy vznikly v období saxonských tektonických pohybů ve

starším teriéru. Při těchto pohybech byly celé Krkonoše vyzdviženy podél dvou rovnoběžných zlomů na severní straně, přičemž nejvýše byl vyzdvižen střední pruh, který tvoří výše zmiňovaný vnější hřbet. Zde jsou také patrné zbytky paleogenního zarovnaného povrchu. Díky výzdvihu pohoří se vodní toky začaly zařezávat hlouběji do svého podloží a vznikala údolí s příkrými svahy. Zvláště významná je zpětná eroze Labe, která prorazila velmi tvrdé horniny kontaktního pásma na jižním okraji krkonošské žuly. V pleistocénu byla některá horská údolí zaledněna. Většina ledovců vznikla v údolích směřujících jižním směrem a údolí byla těmito ledovci přehloubena a mírně rozšířena. V mnohých oblastech jsou pozůstatkem zalednění morénové valy. Nejdelší ledovec v Krkonoších byl ledovec Obřího dolu, který byl v době svého největšího rozsahu dlouhý asi 6 km. Jako důsledek propustnosti morénových valů se na našich jižních svazích se neudrželo ani jedno ledovcové jezírko, na polské straně patří k ledovcovým jezerům např. Wielki a Mały Staw. Mezi typické kary patří jen Kotelní jámy a část Obřího dolu (Demek, 1965).

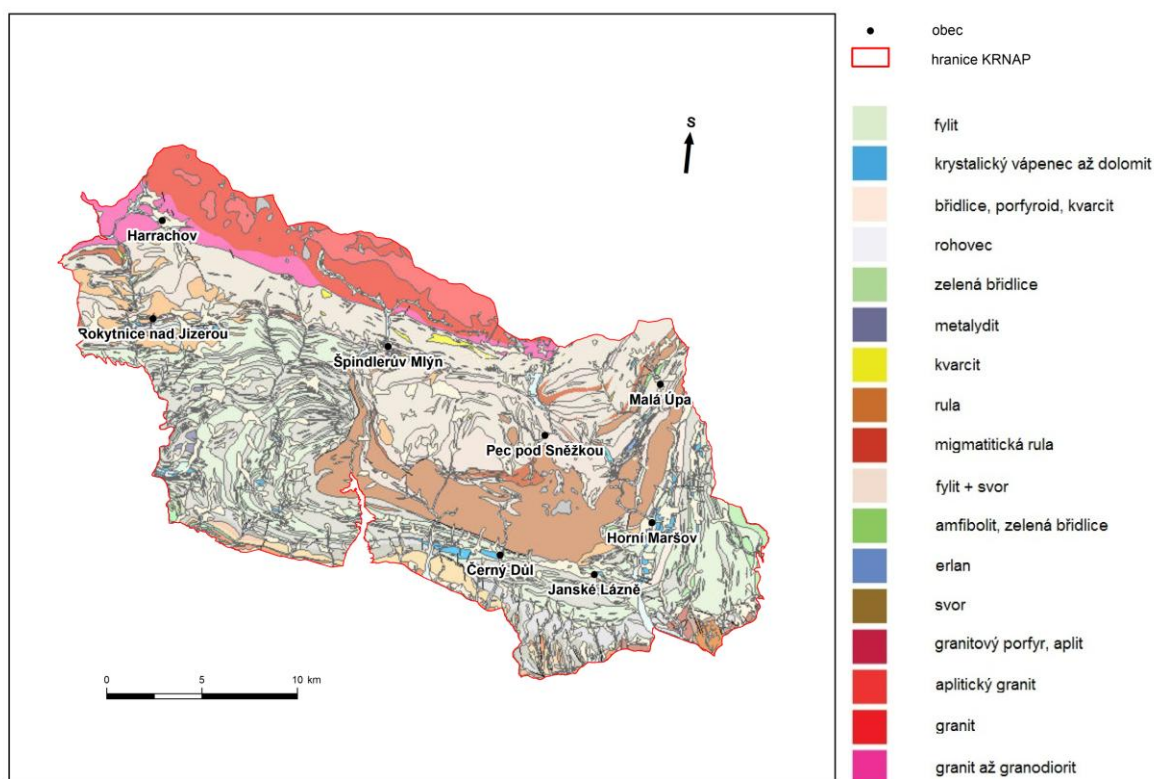
Geologie

Krkonoše jsou výjimečné svým vnitřním stratigrafickým obsahem. Na poměrně malé oblasti se stýká několik různě starých geologických útvarů – sedimentární a vulkanické horniny z období prekambria a paleozoika – horniny těchto souborů jsou zvrásněné a přeměněné v krystalické břidlice. Některé byly zvrásněny a metamorfovány několikrát. Díky těmto pochodům vznikly také rozsáhlé masívy žul a rul (Chaloupský, 1989).

Krkonoše jsou spolu s Jizerskými horami součástí tzv. Krkonoško-jizerského krystalinika, které je tvořeno slabě až středně metamorfovanou regionálně geologickou jednotkou, která patří k nejvýraznějším v severovýchodní části Českého masívu. Jeho jádro je tvořeno mocným komplexem svorů a fylitů obsahujících místy části kvarcitů, amfibolitů, krystalických vápenců a grafitických břidlic (viz obr. 6). Převážná část polských Krkonoš a celý hřeben od Sněžky až po Harrachov je tvořen žulou. Typické pro žulové hřebeny jsou zarovnané a mírně zaoblené vrcholy. Podobně jako u ostatních žulových masívů je krkonošská žula také prostoupena systémem puklin, podle kterých dochází k jejímu typickému rozpadu do kvádrových bloků (Chaloupský, 1989).

Tyto horniny byly vytvořeny ve starohorách a prvohorách zhruba před půl miliardou let. Krystalické břidlice se v rozsáhlé míře vyskytují také v tělesech prekambriálních rul a žul. Tyto břidlice jsou staré cca 600 milionů až 1 miliarda let a pro mnohé krystalické břidlice je typická vrstevnatá struktura. Krystalické břidlice jsou odolnější vůči erozi než žula a na rozdíl od žuly, rozpadající se na kvádry, se rozpadají na ostrohranné úlomky, což

je také jeden z důvodů, proč hřebeny tvořené krystalickými břidlicemi jsou ostřejší a strmější (Chaloupský, 1989).



Obr. 6: Geologická mapa Krkonošského národního parku (Zdroj: http://mapy.geology.cz/geocr_50, upravila: autorka).

MINERÁLNÍ SLOŽENÍ HORNIN

Každá hornina je nehomogenní, tzn. že se skládá z různých minerálů, které se vzájemně liší svým chemickým složením a atomovou stavbou. Chemické složení hornin je na rozdíl od minerálů velmi variabilní a nelze jej tedy vyjádřit chemickým vzorcem. Minerální složení hornin a jejich stavba souvisí vždy s geologickými pochody, kterými vznikly (Petránek, 2007).

GRANIT neboli žula patří mezi kyselé hlubinné magmatické horniny. Je složena z 20 - 40 % z křemene, živce a malého množství tmavých minerálů (5 – 10 %). Z živců je tvořena především alkalickými živci. Z ostatních minerálů se v ní nejčastěji vyskytují biotit nebo muskovit a amfibol. Textura granitu bývá masivní s kvádrovitou odlučností. Granit se může dále členit na alkalický granit, který je velmi bohatý na křemen, nebo na vápenato-alkalický granit, což jsou běžné granity různých barev od šedé až po červenou.

SVOR je metamorfit, který vznikl středně silnou regionální metamorfózou nejčastěji jílovitých sedimentů. Díky množství slídy, k níž se pojí křemen, se vyznačuje výraznou foliací. Obsah živce je mikroskopický nebo dokonce i schází. Právě obsahem živce se svor liší od žul a rul, neboť žuly a ruly hojně obsahují makroskopicky patrné živce. V závislosti na složení matečné horniny se mohou objevit i další minerály jako je např. kyanit, andalusit a granát.

KVARCIT je metamorfovaný klastický sediment bohatý na křemen. Často obsahuje příměs muskovitu, grafitu nebo sericitu (Petránek, 2007).

Ochrana přírody

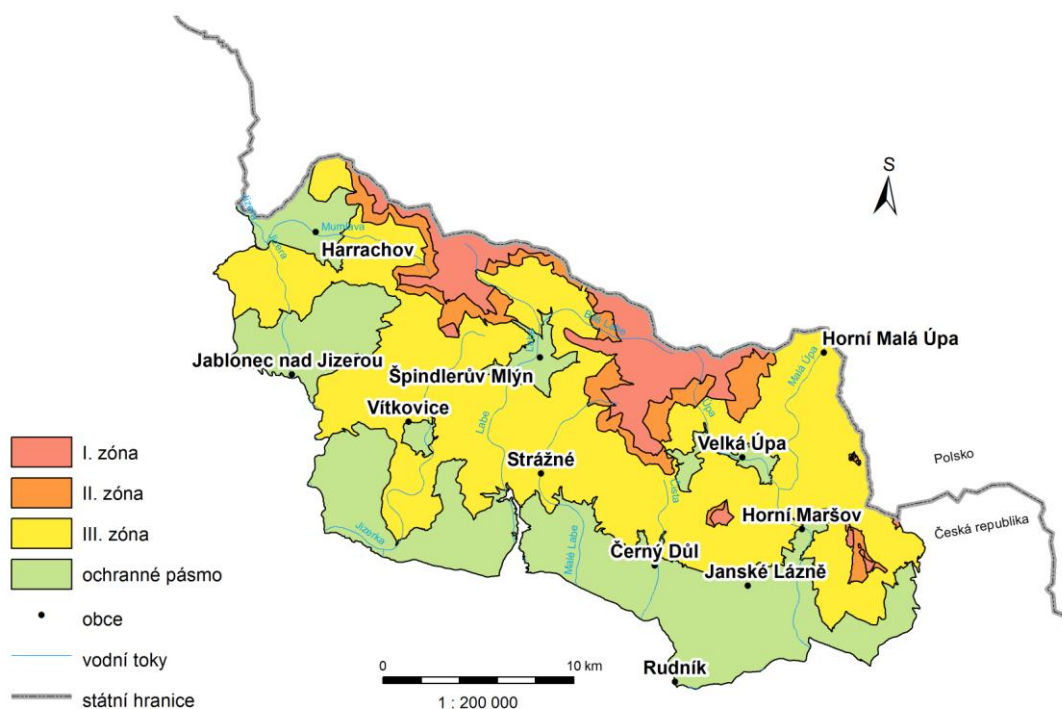
Bohatství Krkonoš bylo již od pradávna předmětem zájmu. Devastace a úbytek lesů v polovině minulého tisíciletí a následné přírodní katastrofy vyvolaly první pokusy po nápravě škod. Byla zakázána pastva a nařízeno zalesňování a hrazení bystrin. Na počátku snah o prosazení ochrany celých Krkonoš formou národního parku stáli přírodovědci a pokrokově smýšlející lesníci. Téměř po 50 letech byla v několika etapách v 50. a 60. letech jejich snaha úspěšně završena vyhlášením Krkonošského národního parku (1963) na české straně a Karkonoskiego Parku Narodowego (1959) na straně polské. Krkonošský národní park (KRNP) se nachází v severovýchodní části České republiky, kde tvoří přírodní hranici s Polskem. Celý národní park leží na území okresů Trutnov (70 %), Semily (cca 30 %) a Jablonec nad Nisou a je tvořen plochou o 548 km² (viz tab. 1). Národní park je orientován od SZ k JV a je tvořen 4 ochrannými pásmy, přičemž každé pásmo má rozdílný ochranný režim (viz obr. 7):

- 1. zóna KRNP – přísná přírodní – nachází se v nejvyšších částech pohoří
- 2. zóna KRNP – řízená přírodní – navazuje v širokém pásu kolem alpínské hranice lesa na 1. zónu
- 3. zóna KRNP – okrajová – rozkládá se ve středních a nižších polohách Krkonoš

Ochranné pásmo již není součástí KRNP, ale tvoří přechod mezi 3. zónou a volnou, intenzivně využívanou krajinou Podkrkonoší (Správa KRNP, 2010).

Tab. 1: Rozloha jednotlivých zón KRNAP (v ha) v jednotlivých okresech (Zdroj: www.krnep.cz)

Okres	I. Zóna	II. Zóna	III. Zóna	Ochranné pásmo	Celkem
Trutnov	3 590	2 428	18 662	10 682	35 362
Semily	913	988	9 676	7 855	19 432
Jablonec nad Nisou	0	0	70	105	175
Celkem	4 503	3 416	28 408	18 642	54 969



Obr. 7: Mapa zonace Krkonošského národního parku (Zdroj: autorka)

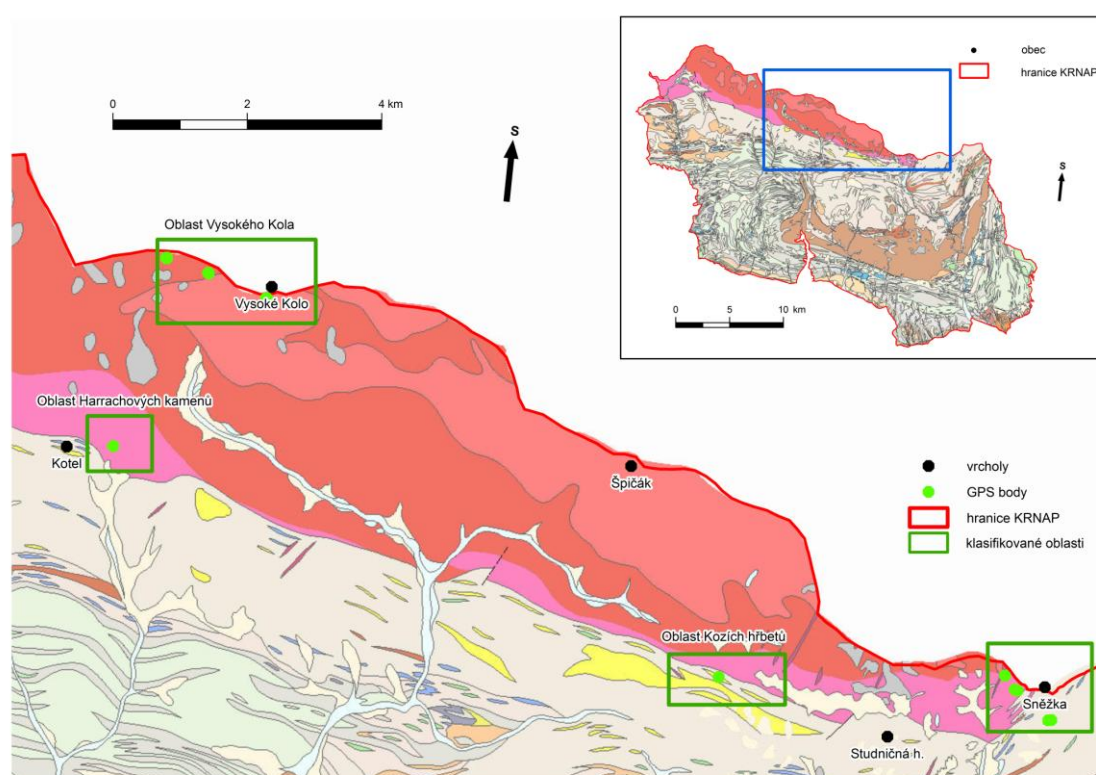
Péčí o Krkonošský národní park (KRNAP) je pověřena Správa Krkonošského národního parku ve Vrchlabí, která je od roku 1991 státní organizací řízenou Ministerstvem životního prostředí ČR.

V rámci Krkonoš jsou průběžně aktualizovány záznamy o geologických lokalitách, které jsou zaměřené především na Maloplošně zvláště chráněná území ČR (Národní přírodní památky, Národní přírodní rezervace, Přírodní památky a Přírodní rezervace). K těmto chráněným oblastem patří např. Harrachovy kameny, důl Harrachov, Josefův Důl, Kotel nebo Labský Důl (ČGS, 2012).

4.2 Data

4.2.1 Terénní data

Tato práce se zabývá kamennými moři a geologickými výchozy ve vrcholových partiích Krkonoš. Pozornost byla zaměřena na oblasti bez vegetačního pokryvu a z důvodu leteckého snímkování celého území bylo nutné se zaměřit na oblasti s rozlohou větší než 4 x 4 m. Výběr vhodných oblastí byl proveden jak s pomocí ortofotomapy, tak i po následné konzultaci s geology a geomorfology. Lokality byly vybrány jak v západní části Krkonoš, tak ve východní části Krkonoš. Tyto dvě hlavní oblasti byly zvoleny z důvodu odlišné geologické stavby. Západní část Krkonoš je tvořena především granitem a východní část Krkonoš (oblast Sněžky) je tvořena zejména svorem (viz obr. 8).



Obr. 8: Vybrané a zaměřené oblasti terénního průzkumu na podkladu geologické mapy Krkonoš
(Zdroj: http://mapy.geology.cz/geocr_50, upravila: autorka)

Na základě tohoto výběru bylo provedeno několik terénních průzkumů spojených se sběrem vhodných vzorků. V západní části Krkonoš byly odebrány vzorky z oblastí Vysokého Kola, Violíku a z oblasti Harrachových kamenů. Ve východní části Krkonoš byly odebrány vzorky z kamenného moře v blízkosti Kozích hřbetů a z východní i západní části Sněžky (viz obr. 9 a 10). Při sběru vzorků byl kladen důraz na výběr horniny typické pro dané okolí. Důležité bylo i pokrytí horniny určitým druhem lišejníku, neboť kamenná moře jsou z velké části pokryta různými druhy lišejníků. Místo sběru vzorků bylo následně

zaměřeno pomocí GPS přijímače a byly pořízeny fotografie. V západní části Krkonoš byla v terénu také naměřena spektra vybraných geologických objektů terénním spektrometrem FieldSpec 4 Wide-Res bezkontaktním způsobem – pomocí optického kabelu namířeného na objekt z výšky cca 100 cm.



Obr. 9: Lokalita Vysokého Kola (Zdroj: autorka)



Obr. 10: Lokalita východní Sněžky (Zdroj: autorka)

Nasbírané geologické vzorky byly v laboratorních podmínkách změřeny stejným typem spektrometru. U každého vzorku bylo změřeno spektrum samotné horniny i jednotlivého druhu lišejníku, pokud se na vzorku vyskytoval. Vzorky byly měřeny s využitím kontaktní sondy, každý nejméně 5x, přičemž tato měření byla následně zprůměrována do výsledného spektra.

U nasbíraných hornin bylo také nutné určit jejich druh. Určení hornin proběhlo za pomoci RNDr. Kryštofa Verneru, Ph.D. z Ústavu petrologie a strukturní geologie přírodovědecké fakulty UK, který určil vzorky ze západní části Krkonoš (oblast Vysokého Kola) a z východní části Krkonoš (západní část Sněžky). Jednotlivé vzorky byly určeny jako granit. Pouze jediný vzorek byl určen jako kvarcit (vzorek z oblasti Kozích Hřbetů). Horniny z východní části potom určila Mgr. Eliška Žáčková, Ph.D. z České geologické služby. Zde byly nasbírány svory, křemeny a jeden vzorek erlánu.

Jak bylo zmíněno výše, většina kamenných moří se skládala z hornin z velké části pokrytých různými lišejníky. S určením jednotlivých druhů lišejníků pomohl RNDr. Jiří Liška, CSc. z Botanického ústavu Akademie věd, který sice částečně potvrdil existenci specifitějších druhů lišejníků na určitých typech hornin (např. vápence vs. silikáty), ale vyloučil možnost určení hornin na základě pokryvu určitým druhem lišejníku. V nasbíraných vzorcích převažují silikáty (granit), pro které je typický žlutozeleně

zbarvený zástupce lišejníku rodu *Rhizocarpon* (obr. 11), dále byly na základě fotografií dr. Liškou orientačně určeny další druhy vyskytující se ve vybraných oblastech. Převládají zelené druhy lišejníků rodu *Rhizocarpon* a *Lecanora* a šedé lišejníky rodu *Porpidia*. Lupenité lišejníky (černé a šedé) byly orientačně zařazeny do rodu *Umbilicaria* (obr. 12).



Obr. 11: *Rhizocarpon* na granitu (Zdroj: RNDr. Lucie Kupková, Ph.D.)



Obr. 12: Různé druhy lišejníků na granitu (Zdroj: RNDr. Lucie Kupková, Ph.D.)

4.2.2 Data skeneru APEX

Území Krkonoš bylo v rámci projektu HyMountEcos snímáno senzorem APEX. Senzor pořizuje data jak ve viditelném a blízkém infračerveném spektru (VNIR) v rozsahu vlnových délek 380 – 970 nm, tak ve středním infračerveném spektru (SWIR) v rozsahu vlnových délek 940 – 2500 nm. Oblast VNIR může obsahovat až 334 pásem. Oblast SWIR obsahuje 199 pásem. Pořízené snímky obsahují celkově 288 pásem v rozsahu vlnových délek 400 – 2460 nm s velikostí pixelu 2,43 m. Snímání proběhlo 10.9.2012 ve výškách 5750 m a 6065 m v časovém rozmezí 10:35 – 14:13 hodin. Celé zájmové území Krkonoš bylo snímáno celkem v 19 liniích. Data pro Českou republiku obsahují 7 letových linií, které jsou již po atmosférických a geometrických korekcích (prováděných po každé letové linii) a obsahují vyhlazená a převzorkovaná spektra. Data jsou v souřadném systému UTM 33N (elipsoid WGS-84). Pro zájmové území této práce bylo zapotřebí čtyř snímků, které byly pořízeny v časech 10:48-10:55, 11:01-11:08 (VITO, 2013).

4.3 Metody zpracování dat

4.3.1 Předzpracování obrazových dat

Klasifikována byla celkem čtyři území – dvě území v západní části Krkonoš (oblast Vysokého Kola a Harrachových kamenů) a dvě území ve východní části Krkonoš (Sněžka a oblast v blízkosti Kozích Hřbetů) (viz obr. 8).

Získané snímky ze senzoru APEX byly nejprve pomocí programu ENVI převedeny do číselného formátu Integer. Převod byl proveden z důvodu zmenšení objemu dat. Snímky byly poté po dvojicích mozaikovány. Po kontrole vytvořené mozaiky byl ale tento krok nakonec zrušen, neboť jednotlivé snímky vykazovaly na hranicích překryvu značné kontrastní rozdíly v obraze. Vyrovnání těchto rozdílů by narušilo spektrální informaci, proto mozaika nebyla použita a snímky byly klasifikovány každý zvlášť. Výjimku tvoří snímky, na kterých je zachycena Sněžka. Na dodaných snímcích je Sněžka zachycena na dvou snímcích, které obsahují specifickou chybu. Z důvodu nedostupnosti digitálního modelu reliéfu pro polskou stranu hranic vznikla při předzpracování dat v jednotlivých snímcích mezera, kvůli které na sebe části snímků nenavazují. Na třetím snímku je Sněžka zachycena částečně. Tento problém byl vyřešen pomocí použití třetího snímku (s částečným zachycením Sněžky) a jednoho chybného snímku, u kterého byla vyříznuta chybná oblast. Tyto dva snímky byly následně mozaikovány bez jakýchkoliv úprav. Vznikl výsledný snímek, na kterém byla zachycena celá oblast Sněžky bez mezer vhodná ke klasifikaci.

U každého snímku byl proveden výřez oblasti, na kterou byla klasifikace zaměřena (viz Příloha 1). Ořezy snímků byly prováděny z důvodu zmenšení objemu dat při jednotlivých klasifikacích.

U každého snímku byla pomocí nástroje Spectral Subset odstraněna pásma 146-160 (1325,6 nm – 1460,4 nm) a 192-222 (1750,6 nm – 1993,1 nm), neboť tato pásma obsahují významné absorpce vodní páry. Pokud by tato pásma byla při klasifikaci ponechána, došlo by ke značnému zkreslení výsledků klasifikace.

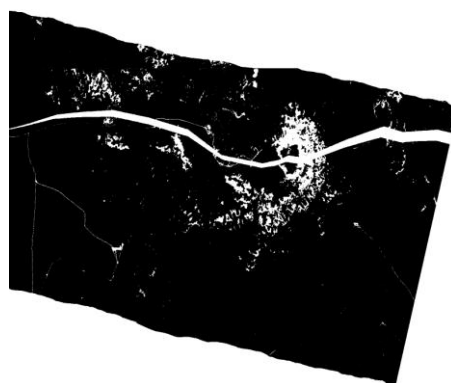
Pomocí nástroje Band Math byla následně vytvořena maska geologických objektů (převážně kamenná moře a skalní výchozy). Tato maska byla vytvořena pomocí vegetačního indexu NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

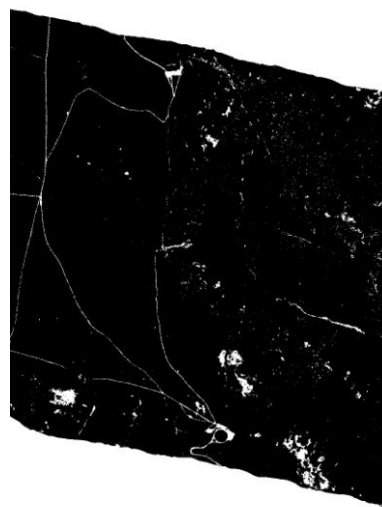
V používaných snímcích tvoří oblast NIR pásmo 82 a oblast RED tvoří pásmo 52. Po použití vegetačního indexu byla vytvořena výsledná maska – pomocí nástroje Build Mask byl zvolen obraz vzniklý předchozím krokem a jako maximální prahová hodnota byla nastavena hodnota 0,4, neboť dobře oddělovala všechny geologické objekty (viz obr. 13 - 16).



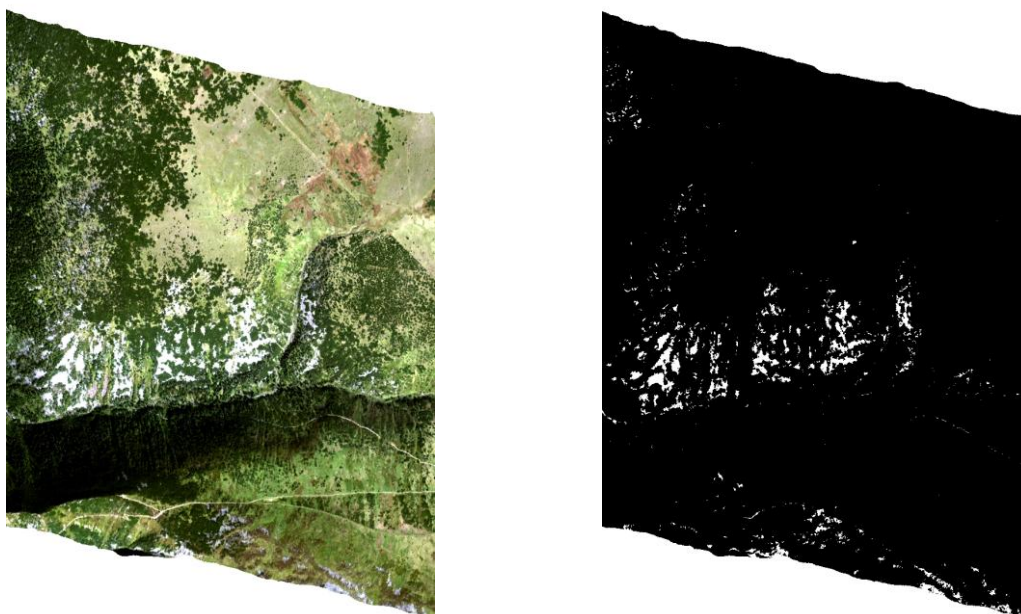
Obr. 13: Snímek a maska geologických objektů v oblasti Sněžky (Zdroj: autorka)



Obr. 14: Snímek a maska geologických objektů v oblasti Vysokého kola (Zdroj: autorka)

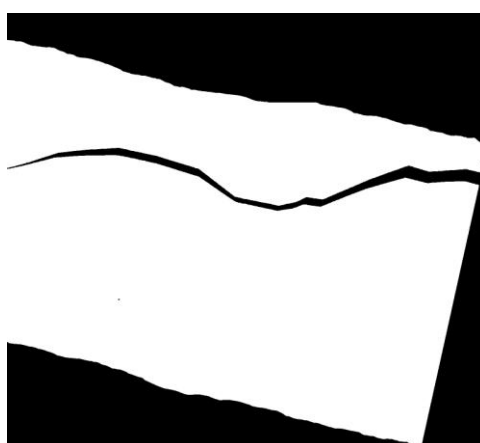


Obr. 15: Snímek a maska geologických objektů v oblasti Harrachových kamenů (Zdroj: autorka)



Obr. 16: Snímek a maska geologických objektů v oblasti Kozích hřbetů (Zdroj: autorka)

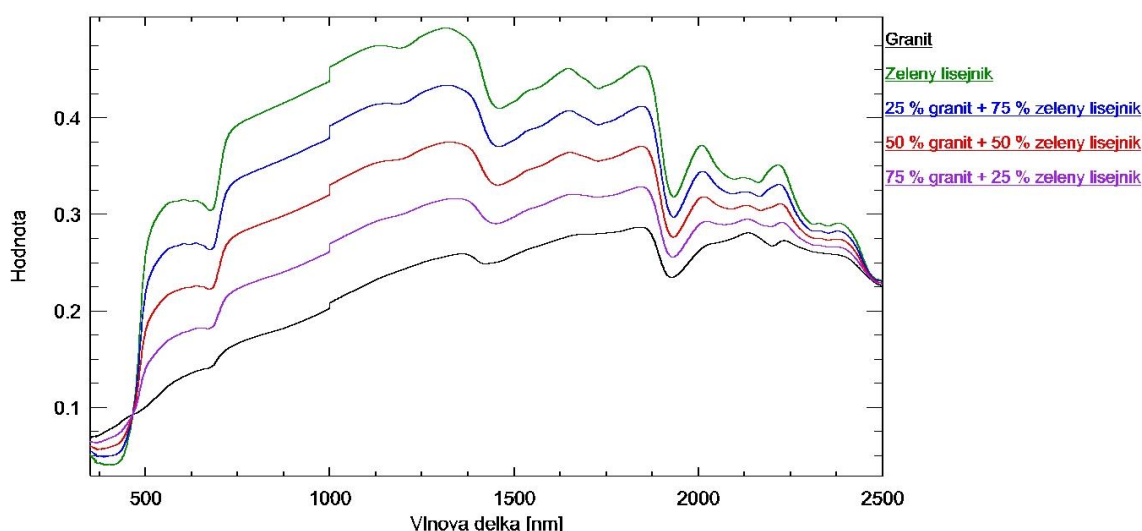
U každého snímku byla ještě vytvořena maska celého snímku. Každý snímek je ohraničen určitou bílou okrajovou oblastí. V této oblasti již sice není zachycen krajinný pokryv, ale i přesto tato oblast disponuje určitými hodnotami, které by mohly do klasifikace vstupovat. Tato maska byla vytvořena proto, aby do klasifikace tyto okrajové hodnoty nevstupovaly a okolí snímku tak nebylo klasifikováno (viz obr. 17).



Obr. 17: Maska celého snímku v oblasti Vysokého Kola (Zdroj: autorka)

4.3.2 Předzpracování laboratorních a terénních spekter

Laboratorně naměřená čistá spektra jednotlivých hornin a lišejníků a terénní spektra hornin a lišejníků, byla uložena ve formátu .asd. Jelikož tento formát ale není programem ENVI podporován, bylo nutné tato spektra uložit jako textový soubor, se kterým už je dále možno v ENVI pracovat. Jednotlivá spektra byla poté uložena do spektrální knihovny. Velká druhová pestrost lišejníků a omezené možnosti určení jejich druhů byly v práci řešeny tím, že byla použita pouze reprezentativní spektra – spektrum zeleného, černého a šedého lišejníku. Laboratorní spektra jednotlivých hornin byla experimentálně smíšena se spektry jednotlivých laboratorně změřených lišejníků (zeleného, černého a šedého) tak, že výsledné spektrum se skládá vždy z 25 %, 50 % a ze 75 % z lišejníku a zbytek tvoří hornina (viz obr. 18). Vznikla tak unikátní spektrální knihovna, která obsahuje více než 100 spektrálních křivek - jak spektra čistých hornin a lišejníků, tak poměrově smíšená spektra různých druhů lišejníků a všech nalezených druhů hornin a také terénní spektra. Spektra ze spektrální knihovny byla poté využita ke klasifikaci.



Obr. 18: Smíšená spektra granitu a zeleného lišejníku (Zdroj: autorka)

4.3.3 Klasifikace obrazových dat

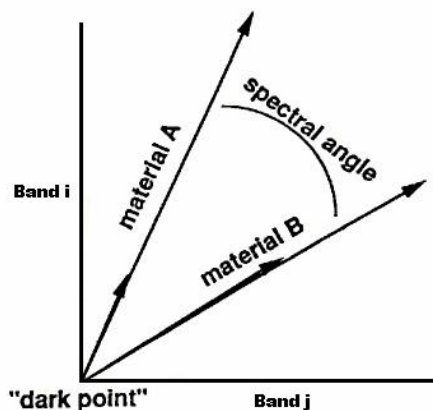
Po předzpracování dat je třeba tato data nějakým způsobem interpretovat. K interpretaci se většinou používá klasifikace. Klasifikaci lze tedy chápat jako rozdělení naměřených hodnot (pixelů) do určitých tříd podle příznaků pomocí automatického algoritmu. Klasifikační příznaky jsou pravidla, podle kterých tato rozdělení realizujeme – spektrální, prostorové, texturální a časové (Kolář, 1990). V našem případě bylo použito spektrálního příznaku, neboť v případě pixelové klasifikace je možno použít prakticky jen tento příznak. V práci byly ke klasifikaci využity metody Spectral Angle Mapper, Spectral

Information Divergence, Linear Spectral Unmixing a Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis a výstupy byly zpracovány pomocí programu ArcGIS Desktop.

Spectral Angle Mapper (SAM)

Tento klasifikátor pracuje s odrazivostí každého pixelu, přičemž odrazivost může být chápána jako n-dimenzionální vektor, kde n představuje počet spektrálních pásem obrazu. Každý vektor má určitou délku a směr – délka vektoru reprezentuje jas a směr vektoru představuje spektrální charakteristiku objektu. Délka vektoru je především ovlivňována změnou osvětlení, a proto je klasifikace založena na směru vektoru (Lumme, 2004).

Je to metoda pro okamžité, řízené srovnání spekter snímku se spektry, která jsou předem známa (obvykle jsou určována v laboratořích spektrometrem). Tato metoda je používána typicky k determinaci minerálů v geologii.



Obr. 19: Spektrální úhel mezi dvěma materiály a dvěma spektrálními kanály (Zdroj: Lumme, 2004)

Klasifikace porovnává úhly mezi spektrem klasifikovaného pixelu a spektrem získaným buď sběrem trénovacích ploch nebo spektrem ze spektrální knihovny. Pixel je pak následně přiřazen ke třídě, ke které má nejmenší spektrální úhel.

Linear Spectral Unmixing (LSU)

Problematika mísení spekter (tzv. „spectral mixture“) je založena na mísení spektrálních odrazivostí několika čistých koncových členů, zjednodušeně řečeno – většina pixelů pořízených hyperspektrálním senzorem je spektrálně „nečistých“, tzn. že hodnota odrazivosti je kombinací odrazivostí materiálů, které se v daném pixelu nacházejí. Důvodů spektrálně mixovaných pixelů může být několik, ale mezi hlavní důvody lze zařadit prostorové rozlišení. V našem případě mohou být některé pixely „nečisté“ z důvodu pokryvu některých hornin lišejníky. Příklad „nečistého“ pixelu je uveden v ENVI Tutorial

(2009) – pokud je 25 % pixelu je tvořeno materiálem A, 25 % pixelu je tvořeno materiálem B a 50 % pixelu je tvořeno materiálem C, je spektrum pixelu váženým průměrem všech materiálů, přičemž jako váhy slouží procentuální zastoupení jednotlivých materiálů v pixelu.

Pro subpixelové zpracování obrazu je nejčastěji užíváno metody „linear spectral unmixing“ – po aplikaci této analýzy je výsledkem obraz, který poskytuje informace o procentuálním zastoupení jednotlivých druhů povrchů na ploše pixelu (které narozdíl od předchozí metody neznáme). Pokud se velké množství hodnot pohybuje nad hodnotou jedna nebo pod hodnotou nula, znamená to nevhodný výběr referenčních pixelů.

Opakem „nečistého“ pixelu je „spektrálně čistý pixel“, jehož odrazivost je tvořena jen jedním materiálem nebo povrchem bez jakékoli příměsi. K určení „spektrálně čistých pixelů“ slouží Pixel Purity Index (PPI) – tento index najde nejvíce spektrálně čisté pixely. Tyto pixely mohou být následně použity jako trénovací soubory. Výpočet PPI probíhá většinou na datech, na kterých byla aplikována transformace MNF (Minimum Noise Fraction Transform). Algoritmus pracuje na bázi iterativního výpočtu, nejprve je odstraněn v obraze šum a redukována dimenzionalita obrazových dat, dále se vypočte index čistoty pixelu pro každý bod a následně jsou vybrány pixely, které jsou vyhodnoceny jako „spektrálně čisté“.

Spectral Information Divergence (SID)

Oproti metodě SAM, která se řadí mezi deterministické metody, patří Spectral Information Divergence (SID) mezi metody pravděpodobnostní. SID je klasifikační metoda, která se zaměřuje na rozdílnost měřeného pixelu od referenčního spektra. Čím je rozdíl menší, tím je větší pravděpodobnost, že jsou si pixely podobné. Pixely s větším rozdílem než je stanovený práh nejsou klasifikovány. Koncové členy mohou být tvořeny jak textovým souborem, tak spektrální knihovnou nebo mohou být extrahovány přímo z obrazu. Zjednodušeně řečeno se SID zaměřuje na spektrální podobnost mezi dvěma vektory (ENVI Tutorial, 2009).

Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA)

Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) je rozšíření metody Spectral Mixture Analysis (SMA). U SMA je spektrum modelováno jako součet čistých spekter jednotlivých koncových členů, kde se každý člen podílí na výsledné váze. SMA má oproti mnoha konkurenčním metodám tu výhodu, že poskytuje smysluplný přehled o krajinném

pokryvu pomocí subpixelového mísení. Rozdíl MESMA od SMA je ten, že MESMA používá spektra jako lineární kombinace čistých spekter, přičemž druhy a počet tzv. endmembers je možno odlišit pro každý pixel a tím minimalizovat RMS (Roberts, 1996).

Na každou klasifikovanou oblast byly použity celkem čtyři klasifikační metody: Spectral Angle Mapper, Spectral Information Divergence, Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis a Linear Spectral Unmixing. V rámci každé klasifikace byla použita jako vstupní spektra:

1. Laboratorní spektra čistých hornin (spektra hornin naměřená v laboratorních podmínkách)
2. Obrazová spektra čistých hornin (spektra nasbíraná z obrazu)
3. Obrazová spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky
4. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky (např. 25 % granitu + 75 % zeleného lišejníku)
5. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se všemi typy lišejníků (př. 25 % granitu + 75 % bílého lišejníku, 25 % granitu + 75 % zeleného lišejníku atd.)
6. Laboratorní spektra čistých hornin a spektra všech čistých lišejníků
7. Laboratorní spektra zeleného lišejníku

Důležité je, že do určitých klasifikací vstupovala jako laboratorní (čistá) spektra ta spektra hornin, které byly nalezeny přímo v dané oblasti. Do některých klasifikací byla použita také terénní spektra (spektra změřená přímo v terénu optickým kabelem pro ty samé druhy hornin, které byly poté měřeny kontaktní sondou v laboratoři).

Všechny snímky, které vstupovaly do klasifikačních procesů, byly pod maskou, která zobrazovala jen kamenná moře a geologické výchozy. U metody LSU byla spektrální knihovna převedena do číselného formátu Integer, neboť i snímky jsou v tomto číselném formátu. U klasifikační metody MESMA bylo nutné spektrální knihovnu „převzorkovat“, neboť tato klasifikační metoda vyžaduje shodný počet spektrálních pásem jak u knihovny, tak u klasifikovaného snímku.

U všech metod byly vyzkoušeny různé změny nastavení, bylo ale zjištěno, že přednastavené hodnoty poskytují nejlepší výsledky. Ke všem klasifikacím bylo tedy přistupováno s přednastavenými hodnotami.

5 VÝSLEDKY

Vzorky hornin ze všech oblastí byly určeny s pomocí geologů: RNDr. Kryštofa Vernerera, Ph.D. z Ústavu petrologie a strukturní geologie PřF UK, který určil vzorky ze západní části Krkonoš (Oblast Vysokého kola) a z východní části Krkonoš (oblast Sněžky a Kozích hřbetů) a s pomocí Mgr. Elišky Žáčkové, Ph.D. z České geologické služby, která určila další vzorky z oblasti Sněžky. Spektra hornin nalezených v dané oblasti byla použita ke klasifikacím. Pro každé území byly výsledky klasifikací všemi čtyřmi metodami pro jednotlivé typy vstupních spekter (7 typů pro oblast Sněžky a 5 prvních typů pro ostatní oblasti - viz kapitola 4.3.3) porovnány v níže uvedených tabulkách a zobrazeny v mapách. Porovnání v tabulkách je zpracováno na základě počtu pixelů, které byly danými metodami zařazeny do jednotlivých klasifikovaných tříd. Je tak také určen podíl pixelů, které byly vyklasifikovány danou metodou z celkového počtu pixelů masky geologických objektů.

5.1 Oblast Sněžky

V oblasti Sněžky byly nalezené vzorky určeny geology jako svor (několik vzorků z východní části Sněžky) a granit (jeden vzorek ze západního svahu Sněžky). Některé vzorky svoru byly porostlé zeleným nebo černým lišejníkem.

Klasifikovaný snímek je složen celkem z 1 039 830 pixelů, z nichž převážnou většinu (kolem 90 %) tvoří po provedených klasifikacích neklasifikované pixely. Masky geologických oblastí Sněžky je složena z 86 000 pixelů.

1. Laboratorní spektra čistých hornin

Tab. 2: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter čistých hornin
(Zdroj: autorka)

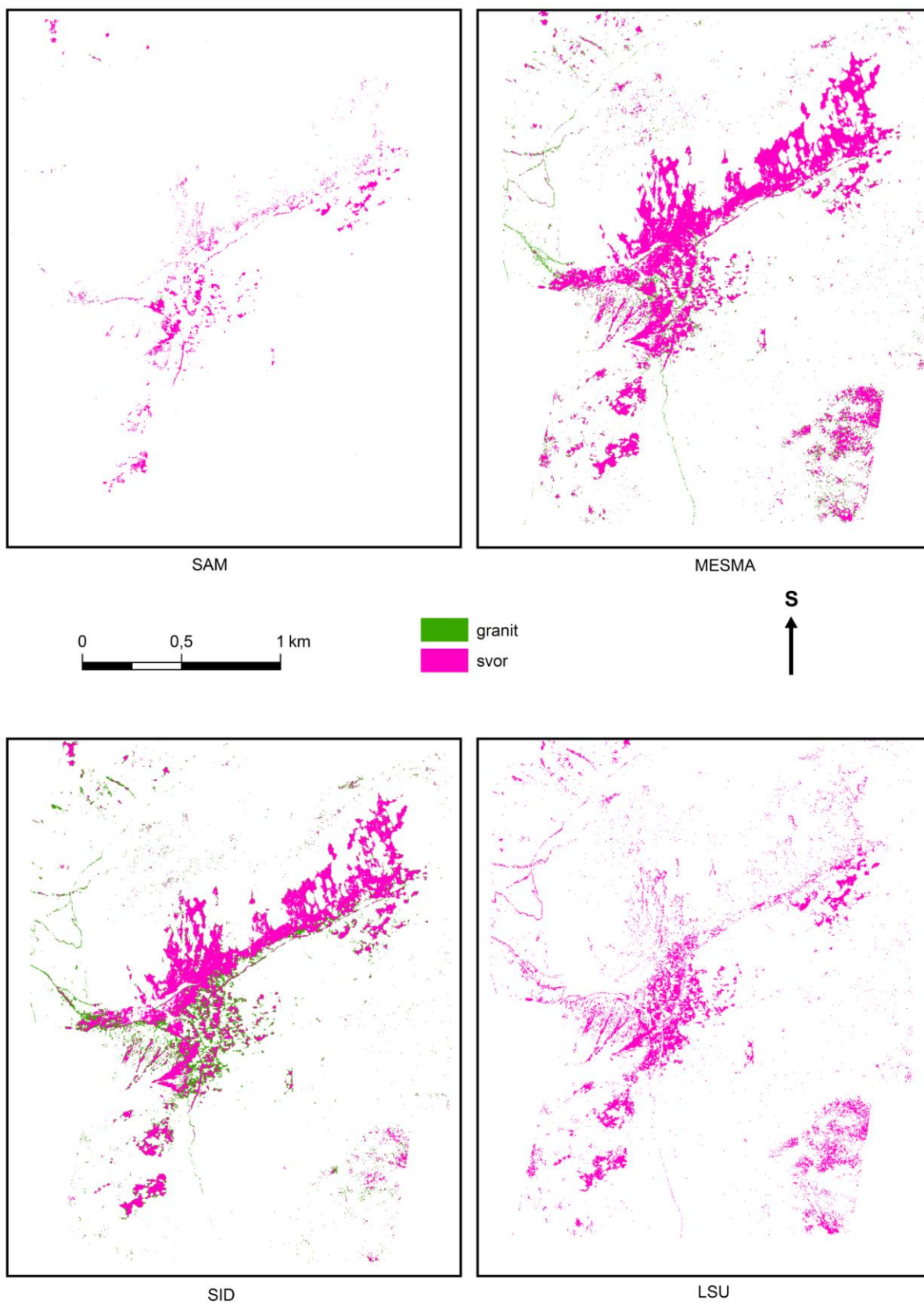
TŘÍDA	SAM		MESMA		SID		LSU	
	Počet	%	Počet	%	Počet	%	Počet	%
GRANIT	93	0,01	10332	0,99	17343	1,67	52	0,01
SVOR	8307	0,80	65332	6,28	46614	4,48	34822	3,35
NEKLASIFIKOVÁNO	1031430	99,19	964166	92,72	975873	93,85	1004956	96,65
CELKEM	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00

Z tabulky 2 je zřejmé, že největší podíl vyklasifikovaných pixelů tvořil u všech klasifikačních metod svor. Oproti tomu granit byl za pomoci laboratorních spekter vyklasifikován u klasifikačních metod SAM a LSU ve velmi malém množství. Výjimku tvoří pouze klasifikátor SID, u kterého bylo vyklasifikováno větší množství granitu než u ostatních použitých klasifikačních metod. Podle Mgr. Karla Martínka, Ph.D. z Ústavu geologie a paleontologie PřF UK se zdá tento klasifikátor velmi nepřesný, neboť v této oblasti není možné takové rozložení hornin, kdy se velmi rychle střídá svor s granitem. Naopak přesnější klasifikační metoda je dle dr. Martínka MESMA, kde je zachycen granit v západní oblasti Sněžky (viz obr. 20). Pokud bychom porovnali tuto klasifikaci s geologickou mapou, lze v této oblasti zachytit patrnou hranici geologických jednotek svoru a granitu. U této metody lze také jasně rozpoznat cesty, které jsou vyklasifikovány jako granit – tuto skutečnost lze odůvodnit tím, že cesty jsou antropogenního původu, tudíž k jejich výstavbě mohl být použit materiál dovezený z jiných oblastí, kde se právě granit vyskytoval.

Tab. 3: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím laboratorních spekter čistých hornin (Zdroj: autorka)

	SAM	MESMA	SID	LSU
Počet vyklasifikovaných pixelů	8400	75664	63957	34874
Celkový počet pixelů	86000	86000	86000	86000
Přesnost	9,77%	87,98%	74,37%	40,55%

Pokud bychom porovnali prostorovou přesnost jednotlivých klasifikačních algoritmů (viz tab. 3), je patrné, že nejvíce vyklasifikovaných pixelů z geologické masky (87,9 %) bylo u metody MESMA a SID (74,4 %). Co se týče ale geologické přesnosti, jak je uvedeno výše, je algoritmus SID značně nepřesný.



Obr. 20: Klasifikace Sněžky za použití laboratorních spekter čistých hornin metodami SAM, MESMA, SID a LSU (Zdroj: autorka)

2. Obrazová spektra čistých hornin

Dále byla ke klasifikaci použita spektra nasbíraná z obrazu (obrazová spektra) (výsledky klasifikací viz obr. 21). Spektra byla sbírána ze zmozaikovaného obrazu Sněžky a to přesně z míst, kde byly odebírány dané vzorky hornin (tedy z bodů odběrů vzorků zaměřených pomocí GPS. Spektrum bylo uloženo a hornina určena pomocí nástroje Spectral Analyst.

Tab. 4: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím obrazových spekter čistých hornin (Zdroj: autorka)

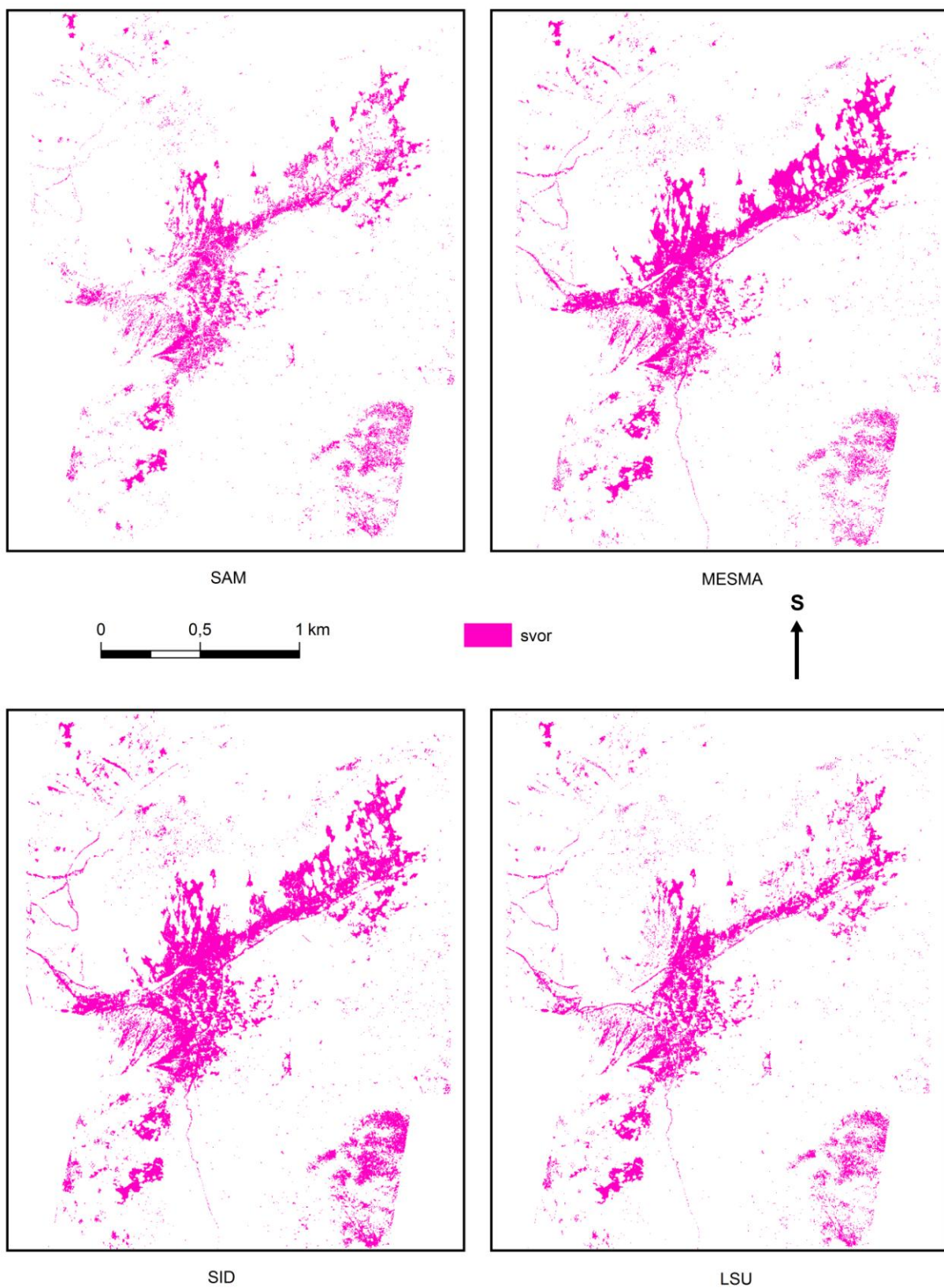
TŘÍDA	SAM		MESMA		SID		LSU	
	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%
GRANIT	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
SVOR	45210	4,35	70037	6,74	50648	4,87	53110	5,11
NEKLASIFI-KOVÁNO	994620	95,65	969793	93,26	989182	95,13	986720	94,89
CELKEM	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00

Zajímavé je porovnání počtu vyklasifikovaných pixelů u klasifikace jen za pomoci laboratorních spekter (viz tab. 2) a jen za pomoci snímkových spekter (viz tab. 4), kdy při klasifikaci s použitím jen obrazových spekter se nepodařilo vůbec vyklasifikovat granit. Oproti laboratorním spektrům se ale podařilo vyklasifikovat mnohem větší množství svoru (viz obr. 20). Po porovnání jednotlivých klasifikačních metod vykazuje největší množství vyklasifikovaných pixelů metoda MESMA, u které bylo vyklasifikováno celkem 6,7 % celého území.

Tab. 5: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím obrazových spekter čistých hornin (Zdroj: autorka)

	SAM	MESMA	SID	LSU
Počet vyklasifikovaných pixelů	45210	70037	50648	53110
Celkový počet pixelů	86000	86000	86000	86000
Přesnost	52,57%	81,44%	58,89%	61,76%

Porovnání jednotlivých klasifikačních algoritmů je uvedeno v tab. 5. Je patrné, že pomocí klasifikátoru MESMA bylo vyklasifikováno největší území z geologické masky. Oproti tomu nejmenší vyklasifikovanou plochou disponuje klasifikátor SAM, který vyklasifikoval pouze 52,6 % území geologické masky.



Obr. 21: Klasifikace Sněžky za použití obrazových spekter čistých hornin metodami SAM, MESMA, SID a LSU (Zdroj: autorka)

3. Obrazová spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky

Za pomoci obrazových spekter byla také provedena klasifikace, kdy byla použita jak obrazová spektra, tak i smíchaná spektra se zelenými lišejníky (viz obr. 22). Počty vyklasifikovaných pixelů udává tabulka 6. Pokud pomineme neklasifikované pixely, tvoří nejvíce zastoupenou třídu u všech klasifikačních metod svor. U metody SAM tvořila nejméně zastoupenou třídu třída tvořená ze 75 % svorem a 25 % zeleným lišejníkem. Naopak u klasifikátoru LSU patří tato třída mezi nejzastoupenější třídy. Zajímavé také je, že u této metody nebyla vůbec vyklasifikovaná třída tvořená z 50 % svorem a 50 % zeleným lišejníkem. Pokud porovnáme tento výsledek s výsledkem klasifikace s použitím laboratorních spekter, je patrné, že u klasifikace s použitím obrazových spekter smíchaných se spektry hornin a zelených lišejníků není vůbec vyklasifikován svor. Naopak některé plochy vyklasifikované s použitím laboratorních spekter byly nahrazeny smíšenými spektry s lišejníky. U metody LSU je také patrné, že byla vyklasifikovaná mnohem větší oblast než za použití pouze laboratorních spekter.

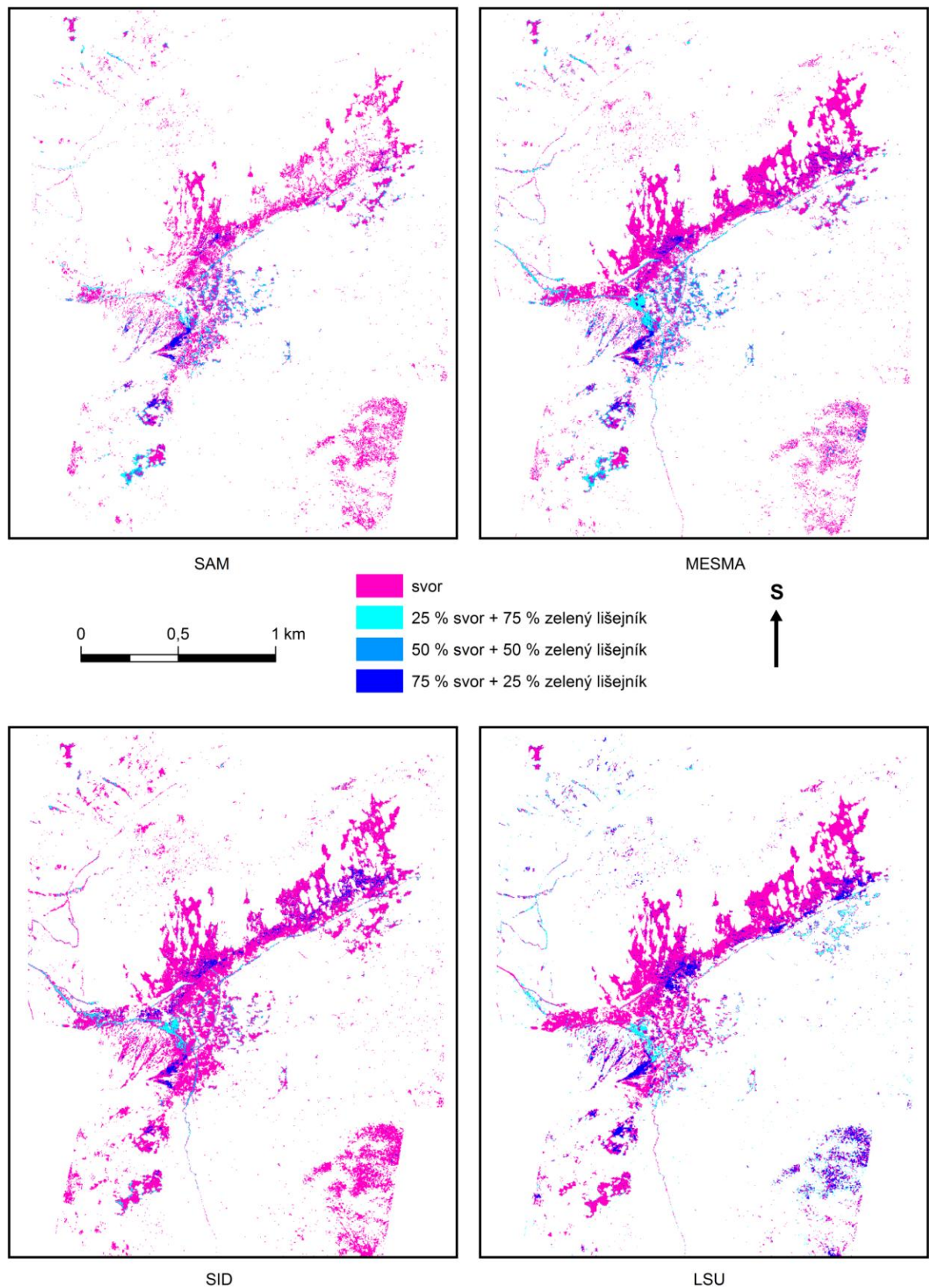
Tab. 6: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím obrazových spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky (Zdroj: autorka)

TŘÍDA	SAM		MESMA		SID		LSU	
	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%
SVOR	39572	3,81	55181	5,31	71896	6,91	54715	5,26
25 % SVOR + 75 % ZELENÝ LIŠEJNÍK	3937	0,38	8901	0,86	4993	0,48	8263	0,79
50 % SVOR + 50 % ZELENÝ LIŠEJNÍK	2921	0,28	3349	0,32	792	0,08	0	0,00
75 % SVOR + 25 % ZELENÝ LIŠEJNÍK	1498	0,14	3513	0,34	4432	0,43	9283	0,89
NEKLASIFIKOVÁNO	991902	95,39	968886	93,18	957717	92,10	967569	93,05
CELKEM	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00

V tab. 7 je udána prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod. Je patrné, že prostorová přesnost za použití obrazových spekter spolu se smíchanými spektry hornin a zelených lišejníků, vykazuje velmi dobré výsledky – nejvíce vyklasifikované oblasti je u metody SID. Metoda MESMA a LSU mají velmi podobné výsledky prostorové přesnosti.

Tab. 7: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím obrazových spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky (Zdroj: autorka)

	SAM	MESMA	SID	LSU
Počet vyklasifikovaných pixelů	47928	70944	82113	72261
Celkový počet pixelů	86000	86000	86000	86000
Přesnost	55,73%	82,49%	95,48%	84,02%



Obr. 22: Klasifikace Sněžky s použitím obrazových spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky metodami SAM, MESMA, SID a LSU (Zdroj: autorka)

4. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky

Dalšími vstupními spektry byla laboratorní spektra hornin a smíchaná spektra zelených lišejníků a hornin (viz obr. 23). Ačkoli byla do spektrální knihovny uložena smíchaná spektra hornin a lišejníků po 10 %, byla nakonec využita pro větší přehlednost smíchaná spektra po 25 %, 50 % a 75 %, která byla také uložena do spektrální knihovny. Procentuální zastoupení i absolutní počty vyklasifikovaných pixelů jsou uvedeny v tab. 8. S použitím této kombinace spekter se již povedlo opět vyklasifikovat dvěma metodami granit (SAM a SID). Nejvíce zastoupenou třídou tvoří u těchto dvou klasifikačních metod kombinace 50 % svoru s 50 % zeleného lišejníku. Oproti tomu u klasifikačních metod MESMA a LSU tvoří nejvíce zastoupenou třídu 75 % svoru + 25 % zeleného lišejníku. U těchto klasifikátorů ale nebyl vyklasifikován granit. Z obr. 23 je patrné prostorové rozložení jednotlivých spekter – dalo by se říci, že na severních a západních svazích převažují horniny méně pokryté zelenými lišejníky, zatímco a na jižních svazích je pokryvnost lišejníky větší. Pokud porovnáme tento výsledek s předchozími výsledky, je na první pohled patrné, že třída čistého svoru je téměř zcela překryta třídou tvořenou horninami smísenými se zelenými lišejníky. Výjimku tvoří vrchol Sněžky, který se stále zobrazuje jako svor. Pravděpodobně proto, že jsou tyto plochy hojně navštěvovány turisty, není zde svor porostlý lišejníkem.

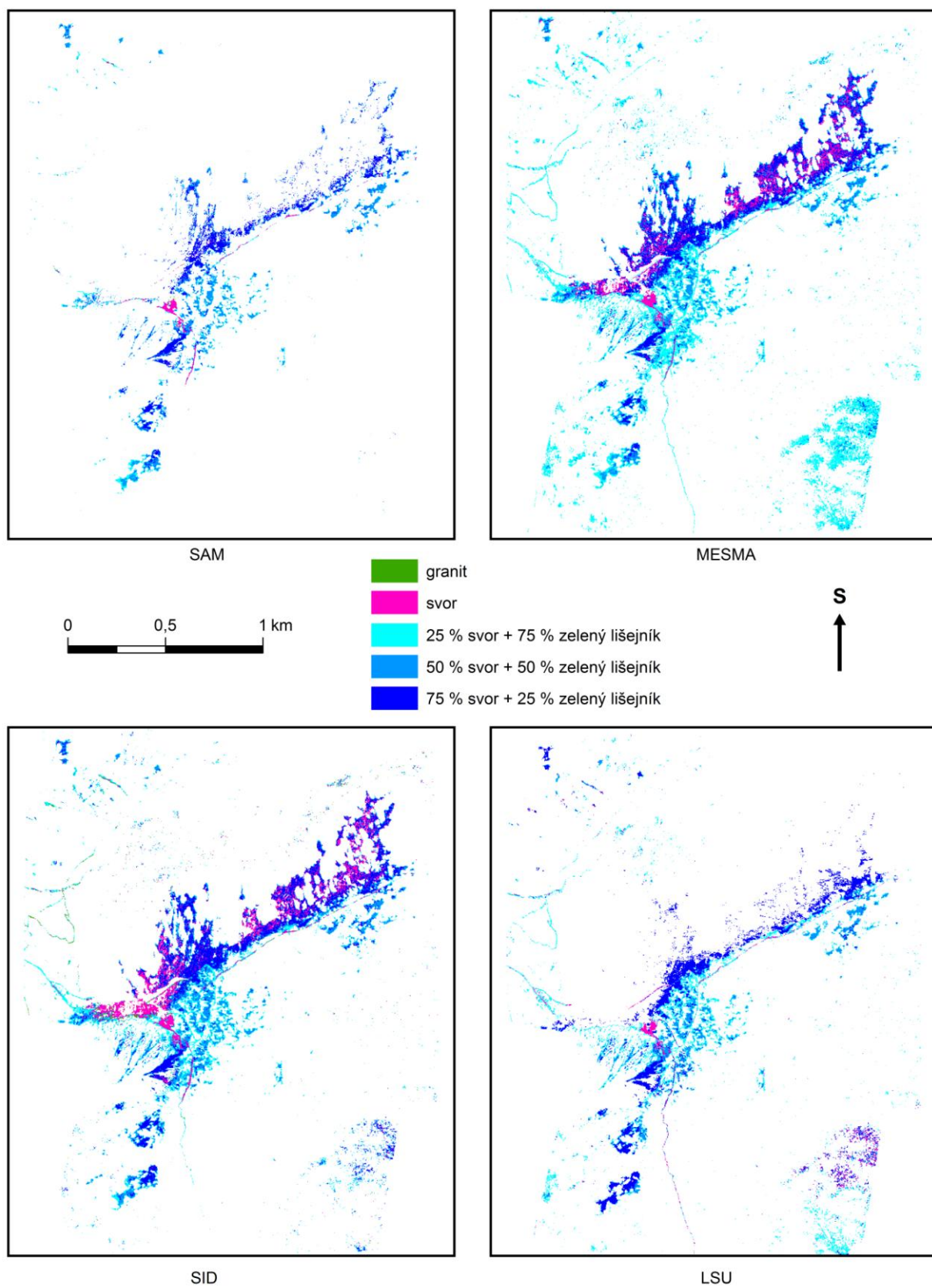
Tab. 8: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky (Zdroj: autorka)

TŘÍDA	SAM		MESMA		SID		LSU	
	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%
GRANIT	61	0,01	0	0,00	1271	0,12	0	0,00
SVOR	1040	0,10	8940	0,86	11593	1,11	2677	0,26
25 % SVOR + 75 % ZELENÝ LIŠEJNÍK	3995	0,38	41143	3,96	16200	1,56	15797	1,52
50 % SVOR + 50 % ZELENÝ LIŠEJNÍK	10855	1,04	16327	1,57	17108	1,65	6215	0,60
75 % SVOR + 25 % ZELENÝ LIŠEJNÍK	8008	0,77	18758	1,80	19564	1,88	15285	1,47
NEKLASIFIKOVÁNO	1015871	97,70	954662	91,81	974094	93,68	999856	96,16
CELKEM	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00

Z tabulky 9 je patrné, že nejmenší prostorovou přesnost má klasifikační metoda SAM, naopak nejvíce vyklasifikovaných pixelů bylo pomocí klasifikační metody MESMA, kde byly vyklasifikovány téměř všechny možné pixely určené ke klasifikaci (99 % geologického území).

Tab. 9: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky (Zdroj: autorka)

	SAM	MESMA	SID	LSU
Počet vyklasifikovaných pixelů	23959	85168	65736	39974
Celkový počet pixelů	86000	86000	86000	86000
Přesnost	27,86%	99,03%	76,44%	46,48%



Obr. 23: Klasifikace Sněžky s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky metodami SAM, MESMA, SID a LSU (Zdroj: autorka)

5. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se všemi typy lišejníků

Stejný postup byl zvolen i u klasifikací, kde byla jako vstupní spektra použita spektra laboratorní a smíchaná spektra hornin se všemi druhy lišejníků (viz obr. 24). I za použití této kombinace spekter se povedlo vyklasifikovat u dvou klasifikačních metod granit a to u SAM a SID. U SID byl granit vyklasifikován dokonce ve větším množství než u předchozích výsledků (tab. 10). Z tab. 10 a obr. 24 je patrné, že převahu mají kombinace spekter hornin smísených se zelenými lišejníky. I zde je patrné, že horniny pokryté černými lišejníky jsou orientovány spíše na sever, oproti tomu horniny pokryté zelenými lišejníky jsou orientovány spíše na jih.

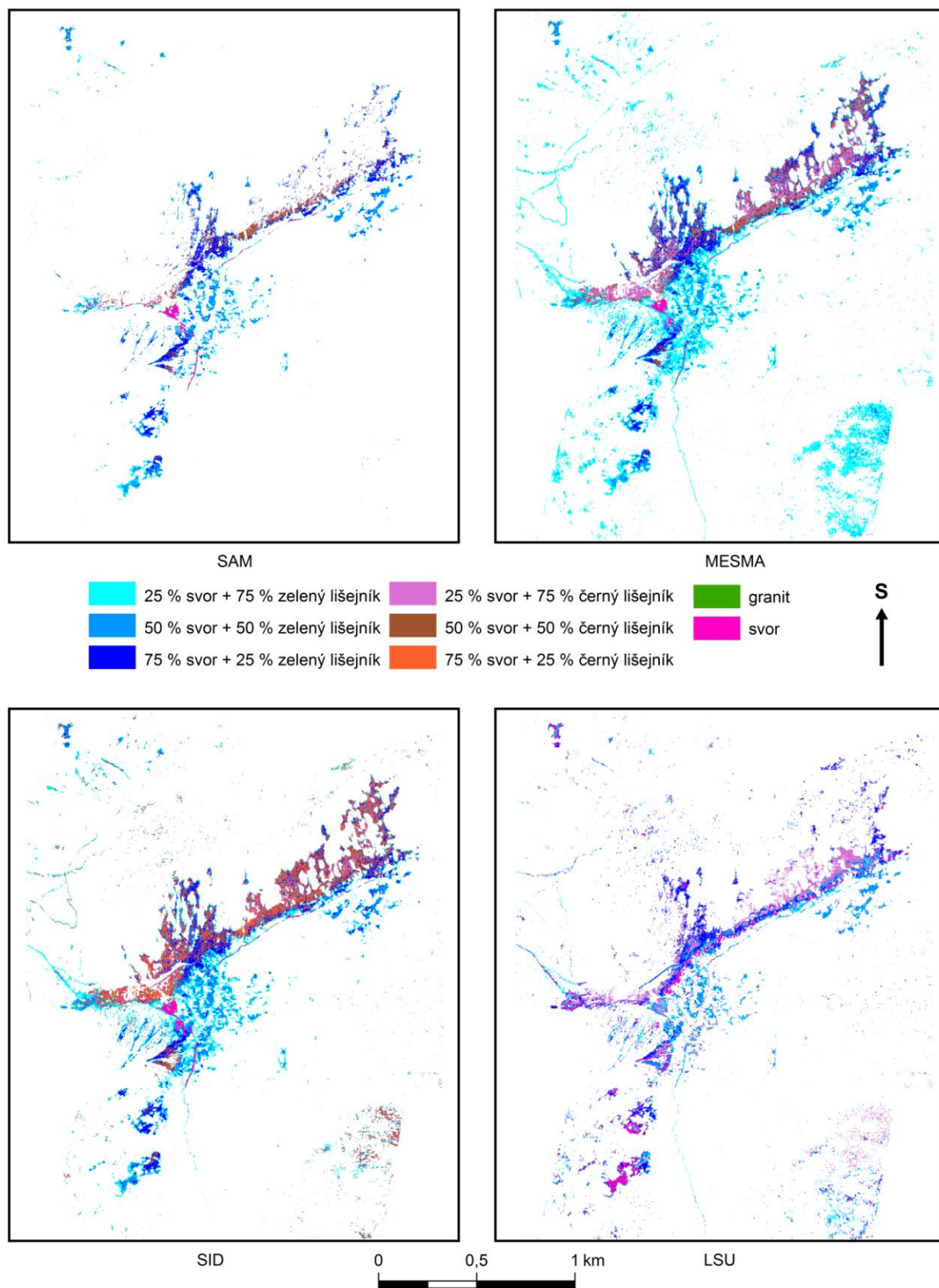
Tab. 10: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se všemi typy lišejníků (Zdroj: autorka)

TŘÍDA	SAM		MESMA		SID		LSU	
	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%
GRANIT	61	0,01	0	0,00	1239	0,12	0	0,00
SVOR	972	0,09	1277	0,12	2742	0,26	6123	0,59
25 % SVOR + 75 % ZELENÝ LIŠEJNÍK	3995	0,38	41042	3,95	16200	1,56	7889	0,76
50 % SVOR + 50 % ZELENÝ LIŠEJNÍK	10747	1,03	15066	1,45	16256	1,56	10501	1,01
75 % SVOR + 25 % ZELENÝ LIŠEJNÍK	6003	0,58	8461	0,81	9147	0,88	8842	0,85
25 % SVOR + 75 % ČERNÝ LIŠEJNÍK	1117	0,11	10484	1,01	3940	0,38	13259	1,28
50 % SVOR + 50 % ČERNÝ LIŠEJNÍK	3110	0,30	7422	0,71	7493	0,72	0	0,00
75 % SVOR + 25 % ČERNÝ LIŠEJNÍK	528	0,05	1416	0,14	11341	1,09	0	0,00
NEKLASIFIKOVÁNO	1013297	97,45	954662	91,81	971472	93,43	993216	95,52
CELKEM	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00

Tabulka 11 udává prostorovou přesnost jednotlivých klasifikačních metod. Nejlepší výsledky jsou dosaženy za použití klasifikační metody MESMA, kdy bylo vyklasifikováno 99 % celkového klasifikovatelného území. Nejméně vyklasifikovaných pixelů je za pomoci metody SAM, kdy je s touto metodou vyklasifikována 1/3 klasifikovatelného území.

Tab. 11: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se všemi typy lišejníků (Zdroj: autorka)

	SAM	MESMA	SID	LSU
Počet vyklasifikovaných pixelů	26533	85168	68358	46614
Celkový počet pixelů	86000	86000	86000	86000
Přesnost	30,85%	99,03%	79,49%	54,20%



Obr. 24: Klasifikace Sněžky s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se všemi typy lišejníků metodami SAM, MESMA, SID a LSU (Zdroj: autorka)

6. Laboratorní spektra čistých hornin a spektra všech čistých lišejníků

Dále byla pro zajímavost ještě vytvořena klasifikace za pomoci laboratorních spekter a spekter obou druhů čistých lišejníků (viz obr. 25). S použitím laboratorních spekter čistých hornin a spekter čistých lišejníků se již povedlo vyklasifikovat granit a také je patrné, že zelený lišejník převažuje nad černým lišejníkem – výjimku tvoří pouze klasifikátor LSU, který vyklasifikoval více černého lišejníku než zeleného a naopak u této metody nebyla vůbec vyklasifikována třída granitu (tab. 12).

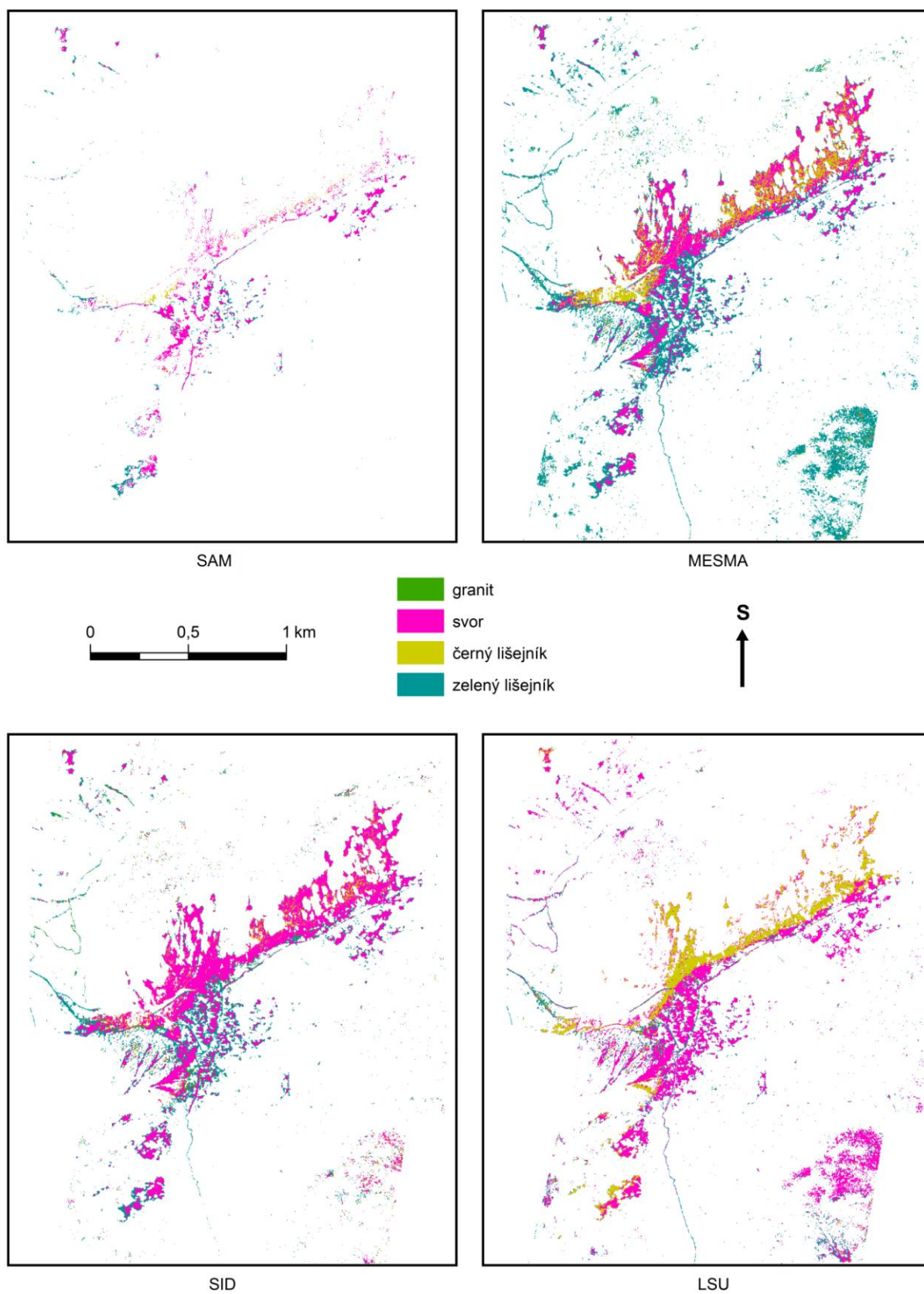
Tab. 12: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter čistých hornin a spekter všech čistých lišejníků (Zdroj: autorka)

TŘÍDA	SAM		MESMA		SID		LSU	
	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%
GRANIT	58	0,01	173	0,02	3592	0,35	0	0,00
SVOR	7973	0,77	27934	2,69	42060	4,04	35354	3,40
ZELENÝ LIŠEJNÍK	3701	0,36	44582	4,29	18286	1,76	10067	0,97
ČERNÝ LIŠEJNÍK	583	0,06	13117	1,26	4270	0,41	15829	1,52
NEKLASIFIKOVÁNO	1027515	98,82	954024	91,75	971622	93,44	978580	94,11
CELKEM	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00

Z hlediska prostorové přesnosti se zde jeví jako nejlepší klasifikační metoda MESMA, díky které bylo vyklasifikováno 99,7 % celkového klasifikovatelného území. Oproti tomu metoda SAM vyklasifikovala pouhých 14,3 % území masky (viz tab. 13).

Tab. 13: Prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod s použitím laboratorních spekter čistých hornin a spekter všech čistých lišejníků (Zdroj: autorka)

	SAM	MESMA	SID	LSU
Počet vyklasifikovaných pixelů	12315	85806	68208	61250
Celkový počet pixelů	86000	86000	86000	86000
Přesnost	14,32%	99,77%	79,31%	71,22%



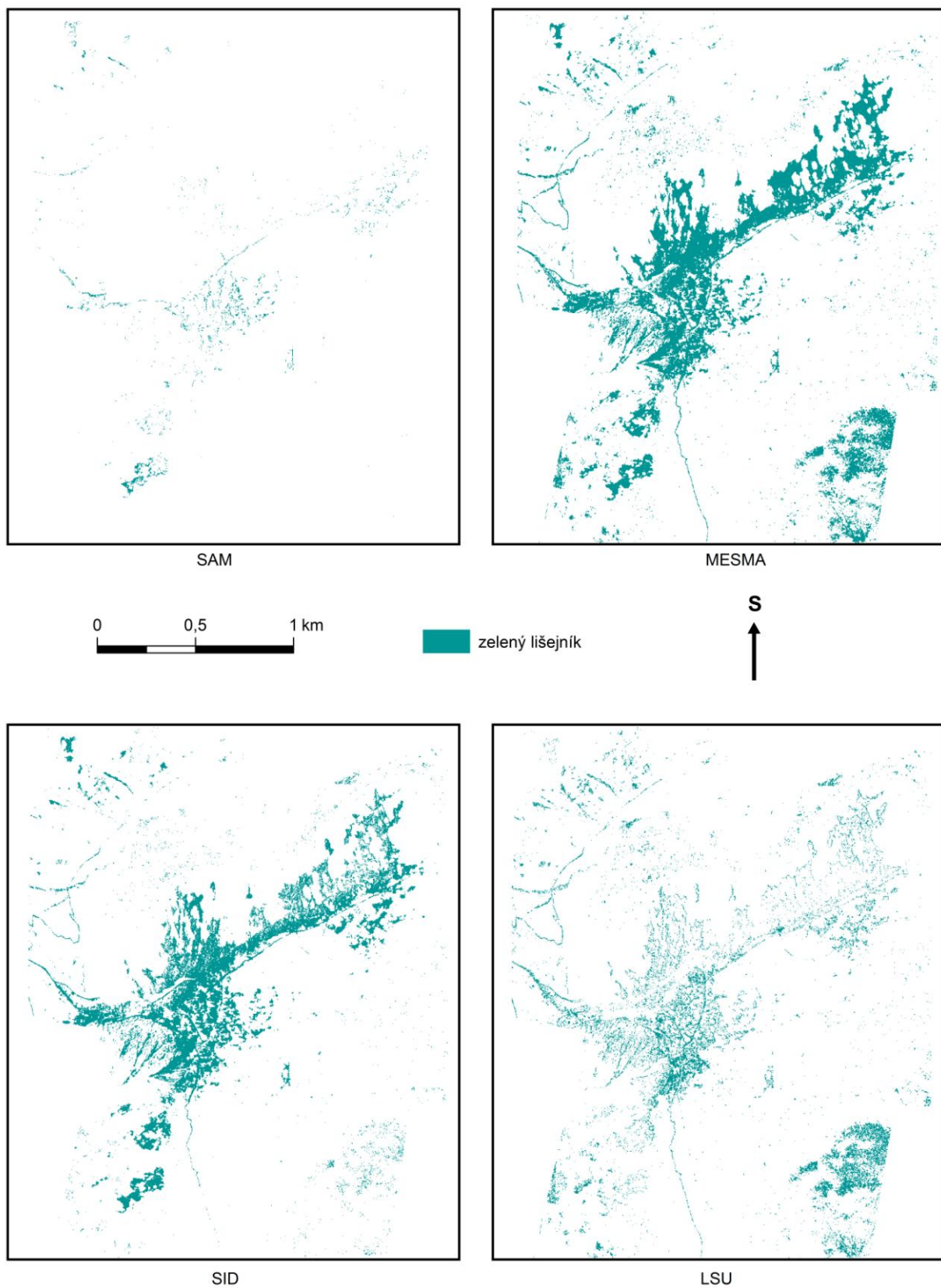
Obr. 25: Klasifikace Sněžky s použitím laboratorních spekter čistých hornin a spekter všech čistých lišejníků metodami SAM, MESMA, SID a LSU (Zdroj: autorka)

7. Laboratorní spektra zeleného lišejníku

Z tab. 14 a obr. 26 je patrné, že nejvíce pixelů vyklasifikovaných jako zelený lišejník, bylo pomocí metody MESMA a SID. Z obr. 26 je patrné, že lišejníky jsou hojně rozšířeny prakticky po celé oblasti, ale přesto nepřekrývají zcela spektra hornin – tento fakt je patrný z klasifikací, kam lišejníky vůbec nevstupovaly, a čisté horniny se dařilo poměrně úspěšně klasifikovat. Z výsledků je ale zřejmé, že pokud spektra lišejníků do klasifikací vstupují, tak se prostorová přesnost zlepšuje. To znamená, že horniny jsou do určité míry lišejníky skutečně „zastíněny“ a klasifikace, do kterých vstupují lišejníky, se jeví jako přesnější.

Tab. 14: Počty a procenta vyklasifikovaných pixelů s použitím laboratorních spekter zelených lišejníků
(Zdroj: autorka)

TŘÍDA	SAM		MESMA		SID		LSU	
	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%	Počet pixelů	%
ZELENÝ LIŠEJNÍK	4045	0,39	84678	8,14	57270	5,51	34346	3,30
NEKLASIFIKOVÁNO	1035785	99,61	955152	91,86	982560	94,49	1005484	96,70
CELKEM	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00	1039830	100,00



Obr. 26: Klasifikace Sněžky s použitím laboratorních spekter zelených lišejníků metodami SAM, MESMA, SID a LSU (Zdroj: autorka)

5.2 Oblast Vysokého kola

Další klasifikovanou oblastí byla oblast Vysokého kola. V oblasti Vysokého kola byla jako vstupní spektra použita spektra hornin nalezených v dané oblasti. Jednalo se o několik vzorků granitu, které byly do různé míry porostlé zeleným nebo šedým lišejníkem.

Klasifikovaný snímek oblasti Vysokého kola je složen celkem z 2 315 352 pixelů, z nichž převážnou většinu (kolem 90 %) tvoří po provedených klasifikacích neklasifikované pixely. Masky geologických oblastí je složena z 59 623 pixelů. V této oblasti bylo pro klasifikace použito pouze prvních pět typů spekter ze seznamu v kapitole 4.3.3 Klasifikace obrazových dat). Pro porovnání byla navíc použita ještě laboratorní spektra čistých hornin spolu se spektry stejných hornin pořízených v terénu.

1. Laboratorní spektra čistých hornin

Z přílohy 2 je patrné, že s použitím laboratorních spekter čistých hornin bylo metodou SAM vyklasifikováno velmi malé množství granitu. Vyklasifikováno bylo celkem 2089 pixelů. Nepatrně lepší výsledky lze pozorovat za použití metody MESMA, kdy bylo vyklasifikováno 24 540 pixelů. Metoda SID vykazuje nejlepší výsledky z hlediska počtu vyklasifikovaných pixelů – 53 834 pixelů, což je 90 % masky geologických objektů.

Z geologického hlediska lze dle dr. Martínka tuto klasifikaci považovat za přesnou, neboť i po porovnání s geologickou mapou je patrné, že se v těchto místech granit skutečně vyskytuje.

• Laboratorní spektra čistých hornin s terénními spektry

U oblasti Vysokého kola byla dále využita laboratorní spektra se spektry naměřenými v terénu (viz Příloha 3). Po použití terénních spekter je možno u všech klasifikací pozorovat větší množství vyklasifikovaných pixelů. S použitím laboratorních i terénních spekter bylo metodou SAM vyklasifikováno celkem 48 564 pixelů tvořících granit, což 81,45 % masky geologických objektů. Metoda MESMA poskytuje nepatrně lepší výsledky než metoda SAM. Za pomoci metody MESMA bylo vyklasifikováno celkem 55 116 pixelů. Metodou SID bylo vyklasifikováno 57 742 pixelů, což tvoří 96,85 % z masky geologických objektů a také prostorově nejpřesnější výsledek.

2. Obrazová spektra čistých hornin

Za použití pouze obrazových spekter (viz Příloha 4) je metodou SAM vyklasifikováno 51946 pixelů z celkového klasifikovatelného území. Metoda MESMA vykazuje za použití obrazových spekter trochu horší výsledky - vyklasifikovaných 48 231 pixelů. Nejlepší výsledky poskytuje klasifikační metoda SID, která vyklasifikovala celkem 57 799 pixelů a zároveň tvoří prostorově nejlepší výsledek – 96,9 % z masky geologických objektů. Po porovnání s přílohou 3 je také patrné, že použití těchto vstupních spekter poskytuje velmi podobné výsledky jako při použití laboratorních spekter s terénními spektry.

3. Obrazová spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky

Z přílohy 5 je na první pohled patrná odlišnost klasifikační metody LSU od ostatních metod. U této metody bylo zařazeno nejvíce pixelů do třídy tvořené ze 75 % granitem a 25 % zeleným lišejníkem. Z této třídy bylo vyklasifikováno celkem 18 181 pixelů. Z hlediska prostorové přesnosti je nejlepší ale klasifikační metoda SID, která vyklasifikovala 98,2 % masky geologických objektů. Oproti tomu se jeví metoda LSU jako prostorově nejhorší – pomocí ní bylo vyklasifikováno 70 % masky geologických objektů.

4. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky

U klasifikace s použitím laboratorních a smíchaných spekter se zelenými lišejníky tvoří u všech klasifikačních metod nejvíce zastoupenou třídu 75 % granitu a 25 % zelený lišejník při klasifikaci metodou SAM (viz Příloha 6). Na první pohled je také patrné snížení počtu pixelů vyklasifikovaných jako čistý granit. Z hlediska prostorové přesnosti je nejlepší metodou metoda MESMA, díky které bylo vyklasifikováno 99,2 % masky geologických objektů. Klasifikátor SID také nevykazuje špatné prostorové výsledky – díky němu bylo vyklasifikováno 98,4 % masky geologických objektů. U metody LSU lze oproti jiným ale jako u jediné pozorovat rozsáhlejší plochu vyklasifikovanou jako čistý granit.

5. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se všemi typy lišejníků

U klasifikace s použitím laboratorních spekter a spekter všech lišejníků smísených s horninami (viz Příloha 7) tvoří opět nejzastoupenější třídu u všech klasifikačních metod třída tvořená ze 75 % granitem a 25 % zeleným lišejníkem. Druhá nejvíce zastoupená třída je u všech klasifikačních metod tvořena kombinací 50 % granitu s 50 % zeleného lišejníku. U metody SAM a MESMA je možno pozorovat výskyt třídy složené ze 75 % granitu a 25 % bílého lišejníku, tyto třídy se v ostatních dvou klasifikačních metodách již

neobjevují. Jako nejlepší klasifikátor z hlediska prostorové přesnosti je MESMA, který vyklasifikoval 99,2 % z masky geologických objektů. Nejhorší výsledky vykazuje naopak LSU, který vyklasifikoval pouhých 75,4 % území masky geologických objektů.

5.3 Oblast Harrachových kamenů

Další klasifikovanou oblastí byla oblast Harrachových kamenů. V této oblasti byly nalezeny vzorky granitu a svoru. Tyto vzorky byly do různé míry porostlé zeleným nebo šedým lišejníkem.

Klasifikovaný snímek oblasti Harrachových kamenů je tvořen celkem z 937 250 pixelů. Masky geologických oblastí je složena z 17 021 pixelů.

1. Laboratorní spektra čistých hornin

S použitím laboratorních spekter čistých hornin (viz Příloha 8) byla metodou SAM vyklasifikována jako nejzastoupenější třída granitu. Zde bylo vyklasifikováno celkem 1921 pixelů. Na první pohled je patrné, že metodou SAM byl celkově vyklasifikován nejmenší počet pixelů. U metody MESMA tvoří také nejzastoupenější třídu granit (celkem 7882 pixelů), podobně tomu je tak i u ostatních klasifikačních metod. Jako prostorově nejpřesnější klasifikátor lze považovat LSU, díky kterému se podařilo vyklasifikovat 85,5 % z klasifikovatelného území masky geologických objektů. Nejhůře dopadla metoda SAM, která vyklasifikovala pouhých 16,5 % území masky geologických objektů. Z geologického hlediska by se dal považovat za nejpřesnější dle dr. Martínka klasifikátor SAM nebo MESMA, neboť u těchto dvou klasifikátorů lze u geologického objektu v pravé spodní části snímku sledovat geologickou hranici mezi granitem a svorem, která tímto místem prochází.

2. Obrazová spektra čistých hornin

Za použití obrazových spekter čistých hornin (viz Příloha 9) ukazují na první pohled všechny klasifikační metody velmi podobné výsledky. Pouze u metody SAM je vyklasifikovaná větší oblast svoru (ve spodní části snímku). Tato oblast je ve skutečnosti cesta, která není přírodního původu, tzn. že materiál, ze které je tvořena, nemusí pocházet právě z této oblasti. Prostorově nejpřesnější klasifikační metoda se jeví metoda MESMA, která vyklasifikovala 93,8 % masky geologických objektů. Jako nejhorší se jeví metoda SAM s 35,9 % vyklasifikovaného území masky geologických objektů.

3. Obrazová spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky

U metody SAM, kde byla použita obrazová spektra spolu se smíchanými spektry hornin a zelených lišejníků, tvoří nejvíce zastoupenou třídu třída tvořená ze 75 % granitem a 25 % zeleným lišejníkem. U metody MESMA, SID a LSU tvoří nejzastoupenější třídu čistý granit (viz Příloha 10). U metody SAM a SID je na první pohled patrná třída svoru (spodní část snímku), která je u ostatních dvou tříd buď změněna nebo z části neklasifikována. Nejvíce vyklasifikovaných pixelů je zachyceno u metody MESMA, kde bylo vyklasifikováno celkem 98,1 % celkového území masky geologických objektů. U metody SAM bylo vyklasifikováno celkem 49 % území masky geologických objektů, což je nejhorší výsledek za použití těchto spekter.

4. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky

S použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky (Příloha 11) bylo nejvíce pixelů metodou SAM vyklasifikováno jako granit. Druhou nejzastoupenější třídu tvořila třída složená ze smíšeného spektra 50% granitu a 50% zeleného lišejníku. U metody MESMA tvoří nejzastoupenější třídu 25 % granitu a 75 % zeleného lišejníku (8625 pixelů). Podobně tomu je tak i u metody LSU, kde patří tato třída také mezi nejzastoupenější třídy. Z hlediska prostorové přesnosti se jeví klasifikační metoda MESMA jako nejpřesnější – pomocí této metody bylo vyklasifikováno 96,9 % území masky geologických objektů. Nejméně území - 22,7 % z masky geologických objektů bylo vyklasifikováno pomocí metody SAM. Pokud bychom se zaměřily na porovnání klasifikací s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky a obrazových spekter smíchaných se zelenými lišejníky, je patrné, že většina ploch klasifikovaných v Příloze 10 jako čistý granit je nyní nahrazena třídou tvořenou z 25 % granitem a 75 % zeleným lišejníkem. Je zajímavé, že tato třída také tvoří většinu cest.

5. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se všemi typy lišejníků

Pokud vizuálně porovnáme výsledky klasifikace s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se všemi typy lišejníků (Příloha 12), je na první pohled patrné, že nejméně vyklasifikovaných ploch je u metody SAM (22,7 % z masky geologických objektů). Oproti ostatním metodám lze pozorovat u metody LSU ve spodní části snímku nevyklasifikovaný svor. Nejzastoupenější třídou u všech klasifikačních metod je třída tvořená z 25 % granitem a 75 % zeleným lišejníkem. Prostorově nejpřesnější metodou je opět MESMA, díky které bylo vyklasifikováno celkem 96,9 % z masky geologických objektů.

5.4 Oblast Kozích hřbetů

Poslední klasifikovanou oblastí byla oblast v blízkosti Kozích hřbetů. V této oblasti byly nalezeny vzorky granitu, svoru a kvarcitu, přičemž všechny vzorky byly zčásti porostlé různými druhy lišejníků.

Klasifikovaný snímek oblasti Kozích hřbetů je tvořen celkem z 891 540 pixelů. Masky geologických objektů je složena z 15 872 pixelů.

1. Laboratorní spektra čistých hornin

S použitím laboratorních spekter byly v oblasti Kozích hřbetů vyklasifikovány všechny horniny, jejichž spektra byla použita jako vstupní (viz Příloha 13). U metody SAM, MESMA a SID převažoval granit. Jako prostorově nejlepší je s 88,3 % vyklasifikovaného území masky geologických objektů SID. Z geologického hlediska je ale dle dr. Martínka tento klasifikátor nepřesný, neboť není možné v přírodě takovéto zastoupení hornin, kdy jsou např. svory „obaleny“ granitem a naopak. Ostatní klasifikátory již vypadají věrohodněji, neboť klasifikované oblasti leží pod svahem a podle geologické mapy je možné, že se horniny nacházející nad těmito oblastmi mohly dostat různými geomorfologickými procesy na místa, která ukazují klasifikace.

2. Obrazová spektra čistých hornin

Za pomoci obrazových spekter byly sice vyklasifikovány všechny vzorky, jejichž spektra byla použita jako vstupní (viz Příloha 14), pokud ale tento výsledek srovnáme s předchozím (viz Příloha 13), je patrné, že u metody SAM a MESMA bylo vyklasifikováno poměrně menší množství kvarcitu. Nejzastoupenější třídou je opět u všech metod granit. Největšího množství vyklasifikovaných ploch bylo dosaženo pomocí klasifikační metody SID, která vyklasifikovala 98,1 % masky geologických objektů.

3. Obrazová spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky

S použitím obrazových spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky (viz Příloha 15) lze pozorovat velmi podobné výsledky jako u klasifikací s použitím obrazových spekter. Pokud porovnáme tyto dva výstupy, lze pozorovat výraznější změnu pouze u

metody LSU, kde byla většina ploch vyklasifikovaných jako svor, nahrazena čistým granitem. Smíšená spektra hornin a zelených lišejníků lze pozorovat jen ve velmi malém množství u metody SAM a SID. U metody MESMA nebyly dokonce vyklasifikované žádné třídy tvořené horninami s lišejníky. Nejvíce možných pixelů bylo vyklasifikováno pomocí metody SID (98,4 % masky geologických objektů).

4. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky

Po porovnání předchozího výsledku s výstupem s použitím laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se zelenými lišejníky (viz Příloha 16) je na první pohled patrný rozdíl. Většina vyklasifikovaných ploch již netvoří třídy čistých hornin, nýbrž třídy hornin smíšených s lišejníky. Metodou SAM bylo vyklasifikováno 4622 pixelů tvořících nejzastoupenější třídu tvořenou z 50 % granitem a 50 % zeleným lišejníkem. Z hlediska prostorové přesnosti byla vyhodnocena klasifikační metoda SID jako nejlepší – vyklasifikovala celých 100 % klasifikovatelného území masky geologických objektů.

5. Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se všemi typy lišejníků

Pokud bychom porovnali předchozí výstup s nynějším výstupem tvořeným z laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se všemi typy lišejníků (viz Příloha 17), bylo by na první pohled patrné, že se výstupy od sebe příliš neliší. Patrnější změna je u klasifikační metody SID, kde je poměrně větší množství vyklasifikované třídy tvořené ze 75 % granitem a 25 % bílým lišejníkem. MESMA je opět z prostorového hlediska hodnocena jako nejpřesnější – vyklasifikovala 100 % území masky geologických objektů (viz tab. 15).

Z tab. 15 je patrné, že v oblasti Sněžky se jako prostorově nejpřesnější klasifikační metoda jeví metoda MESMA (výjimku tvoří metoda SID za použití obrazových spekter se smíchanými zelenými lišejníky). Tato metoda je z hlediska prostorové přesnosti nejlepší také v oblasti Harrachových kamenů. V oblasti Vysokého kola a Kozích hřbetů se jeví jako prostorově nejpřesnější metoda SID, kde se prostorová přesnost pohybuje kolem 98 % vyklasifikovaných geologických objektů. U všech oblastí se jako nejméně přesná metoda jeví metoda SAM a LSU. Tyto dvě metody vyklasifikovaly nejmenší podíl z masky geologických objektů.

Z tab. 15 je také patrné, že čím více spekter vstupovalo do klasifikací jako vstupních, tím přesnější (z hlediska prostorové přesnosti) klasifikace byly. Nejpřesnější byly klasifikace zpracované s využitím laboratorních spekter čistých hornin smísených se všemi typy lišejníků.

OBLAST	VSTUPNÍ SPEKTRA	SAM	MESMA	SID	LSU
Oblast Sněžky	Laboratorní spektra čistých hornin	9,77%	87,98%	74,37%	40,55%
	Obrazová spektra čistých hornin	52,57%	81,44%	58,89%	61,76%
	Obrazová spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky	55,73%	82,49%	95,48%	84,02%
	Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky	27,86%	99,03%	76,44%	46,48%
	Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se všemi typy lišejníků	30,85%	99,03%	79,49%	54,20%
	Laboratorní spektra čistých hornin a spektra všech čistých lišejníků	14,32%	99,77%	79,31%	71,22%
	Laboratorní spektra zeleného lišejníku	4,70%	98,46%	66,59%	39,94%
Oblast Vysokého kola	Laboratorní spektra čistých hornin	3,50%	41,15%	90,29%	73,71%
	Obrazová spektra čistých hornin	87,12%	80,89%	96,94%	86,65%
	Obrazová spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky	93,11%	89,21%	98,19%	70,08%
	Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky	89,24%	99,16%	98,43%	87,30%
	Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se všemi typy lišejníků	90,29%	99,18%	98,43%	75,38%
Oblast Harrachových kamenů	Laboratorní spektra čistých hornin	16,46%	52,49%	64,55%	85,55%
	Obrazová spektra čistých hornin	35,90%	93,76%	86,37%	66,84%
	Obrazová spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky	48,94%	98,06%	87,48%	78,02%
	Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky	22,74%	96,92%	70,71%	78,91%
	Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se všemi typy lišejníků	22,74%	96,93%	71,10%	78,99%
Oblast Kozích hřbetů	Laboratorní spektra čistých hornin	42,15%	88,30%	98,67%	62,50%
	Obrazová spektra čistých hornin	76,04%	84,04%	98,07%	90,35%
	Obrazová spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky	77,72%	84,04%	98,38%	71,48%
	Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se zelenými lišejníky	60,06%	100,00%	98,33%	44,90%
	Laboratorní spektra čistých hornin smíchaná se všemi typy lišejníků	60,47%	100,00%	98,38%	44,90%

Tab. 15: Přehled prostorových přesností vstupních spekter u všech oblastí (Zdroj: autorka)

6 SHRNUTÍ A DISKUZE

V rámci této práce bylo provedeno geologické mapování ve vrcholových partiích Krkonoš za použití hyperspektrálních dat. Ačkoli k problematice geologického mapování pomocí hyperspektrálních dat existuje mnoho studií, v případě geologického mapování s použitím smíšených spekter hornin a různých druhů lišejníků je tomu právě naopak. V rámci terénního výzkumu byly navštíveny čtyři oblasti, přičemž pouze ve dvou oblastech bylo možné díky dobrým meteorologickým podmínkám uskutečnit terénní měření. V ostatních dvou oblastech byly alespoň sebrány vzorky, jejichž laboratorně změřená spektra následně vstupovala do jednotlivých klasifikací.

Při klasifikačních procesech se objevily různé problémy, na jejichž řešení je třeba se do budoucna zaměřit. Hlavní problém byl již zmiňován a tím byly samotné snímky. Jelikož byly snímky na začátku prací převedeny na číselný formát Integer, bylo by také dobré převést samotnou spektrální knihovnu na daný číselný formát. Tento krok byl nutný pouze v případě klasifikace pomocí LSU, kde se výsledné hodnoty po použití původní (nepřevedené) knihovny pohybovaly ve vysokém rozmezí. Ovšem ani po převedení spektrální knihovny do číselného formátu Integer nenabývaly hodnoty výsledných obrazů požadovaných hodnot 0-1.

U klasifikátoru MESMA byl problém s klasifikací snímku, na kterém byla již přeložena maska – u této klasifikační metody vždy vypadla jedna ze zadaných tříd. Tento problém byl vyřešen tak, že jako vstupní spektrum bylo nějaké spektrum zadáno dvakrát. Tento problém byl zřejmě způsoben číselným formátem snímku. Je možné, že pokud by snímek byl v původním formátu Float, tento problém by nenastal.

Při vytváření masek geologických objektů sledovaných území byl problém nastavení správné prahové hodnoty tak, aby bylo zobrazeno co největší množství geologických objektů a zároveň odmaskováno co největší množství vegetace. Po vizuální kontrole (viz obr. 13 – 16) lze říci, že prahová hodnota byla nastavena správně a důležité geologické objekty byly zobrazeny.

V oblasti Sněžky byla ke klasifikaci použita spektra granitu a svoru. Z geologického hlediska jsou klasifikace v oblasti Sněžky dle dr. Martínka poměrně přesné – zejména klasifikační metoda MESMA udává nejpřesnější výsledky, neboť je na ní vidět zachycení geologické hranice mezi granitem a svorem v západní oblasti Sněžky. Naopak klasifikační metoda SID sice vyklasifikuje velké množství pixelů, ale z geologického hlediska jsou tyto výsledky nepřesné.

Z dosažených výsledků je také patrné, že by bylo dobré kombinovat jak spektra laboratorní tak i spektra obrazová, neboť za použití obou těchto typů spekter je vyklasifikována mnohem větší plocha než za použití jen laboratorních spekter.

K problematice rozložení lišejníků bylo potvrzeno RNDr. Jiřím Liškou, CSc. z Botanického ústavu Akademie věd, že neexistuje bohužel žádná literatura, která by se tímto problémem zabývala. Není tedy možné ověřit přesnost výsledků klasifikací spekter se smíšenými lišejníky. Výstupy obsahující smíšená spektra hornin a lišejníků by se daly tedy považovat za unikátní výsledek této práce. Lze ale říci, že spektra se smíšenými lišejníky do jisté míry ovlivňují přesnost klasifikace. Čím přesněji jsou horniny a lišejníky namíchány, tím lépe vystihují skutečnost v terénu. Z výsledků je také patrné rozložení určitých typů lišejníků – na severním svahu Sněžky lze pozorovat převahu černých lišejníků nebo kombinaci smíšeného granitu s lišejníkem (75 % granit + 25 % zelený lišejník), kdežto na jižních svazích lze spíše pozorovat zelené lišejníky nebo kombinaci horniny s lišejníkem (zejm. 25 % granitu + 75 % zeleného lišejníku). Otázkou zůstává, do jaké míry je tento výsledek ovlivněn zastíněním severních svahů.

V oblasti Vysokého kola lze také potvrdit, že pokud jsou použita pouze laboratorní spektra hornin, je vyklasifikováno mnohem menší množství pixelů než za použití obrazových spekter nebo za použití kombinace laboratorních a terénních spekter.

Z hlediska prostorové přesnosti se jeví klasifikační metoda SID jako nejpřesnější. Díky této metodě bylo vyklasifikováno vždy okolo 95 % území masky geologických objektů. Pokud byla ale jako vstupní spektra použita laboratorní spektra čistých hornin smíšených s lišejníky, byla vyhodnocena jako nejlepší klasifikační metoda MESMA. Z výsledků je také patrné, že pokud vstupují do klasifikací smíšená spektra hornin s lišejníky, zvyšuje se prostorová přesnost jednotlivých klasifikačních metod.

V oblasti Harrachových kamenů poskytuje dle dr. Martínka za použití laboratorních spekter čistých hornin nejlepší výsledky klasifikátor SAM nebo MESMA, neboť u těchto klasifikačních metod je zachycena geologická hranice mezi granitem a svorem, vyskytující se ve spodní části snímku. U všech ostatních spekter byla jako prostorově nejpřesnější metoda určena MESMA.

U oblasti Kozích hřbetů byla jako prostorově nejlepší vyhodnocena metoda SID. Ačkoliv je tato metoda prostorově nejlepší (vyklasifikuje největší množství pixelů) je z geologického hlediska dle dr. Martínka nejméně přesná, neboť výsledky této klasifikační metody neodpovídají realitě.

Po provedení všech klasifikací bylo zjištěno, že výsledné klasifikace odpovídají geologické mapě, a že SAM patří skutečně mezi nejméně časově náročné klasifikační

metody (Lumme, 2004). Oproti tomu ale také bylo potvrzeno, že klasifikátory SAM a LSU skutečně vyklasifikují velmi malé množství celkové klasifikovatelné plochy (McHugh, et. al., 2003). Mezi časově nejnáročnější klasifikátory lze zařadit SID a pokud se započítá i následná interpretace, pak i LSU.

Pro jemné rozdíly mezi různými materiály doporučili Hubbard, et. al. (2005) ve své studii zaměřené na geologické mapování klasifikační metodu SAM. Tato metoda byla také použita pro geologické mapování v horském terénu v Taiwanu (Chang, Liu, 2005). Ačkoli byla v rámci této práce tato metoda použita také v horském terénu, nevykazovala tak dobré výsledky, jako ve zmíněných studiích. Z hlediska prostorové přesnosti vykazovala tato metoda jedny z nejhorších výsledků.

Z hlediska prostorové přesnosti bylo u všech sledovaných oblastí dosaženo velmi dobrých výsledků – vždy bylo vyklasifikováno kolem 90 % masky geologických objektů. Při geologickém mapování v okolí Etny (Amici, et. al. (2011) bylo dosaženo podobných výsledků s tím rozdílem, že byl použit klasifikátor Support Vector Machine. Do budoucna by jistě bylo zajímavé zařadit i tento klasifikátor a porovnat přesnost této klasifikační metody s dosaženými výsledky.

Pro vegetačně i geologicky rozmanité území bylo Robertsem, et. al. (1996) navržena jako vhodná metoda MESMA. Bylo zjištěno, že tato metoda skutečně vyklasifikuje větší množství tříd než dříve velmi používaná metoda SAM.

Co se týče spektrální odrazivosti jednotlivých lišejníků, byla potvrzena vyšší odrazivost u všech zelených lišejníků a také se potvrdila vyšší absorpce okolo hodnoty 650 nm (Rees et. al. , 2004). Stejně jako ve studii Bechtel, et. al. (2002) bylo také potvrzeno, že lišejníky mají skutečně vliv na výsledné spektrum horniny a jednotlivé pixely obrazu jsou míseny spektrem jednotlivých lišejníků vyskytujících se na horninách.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo zmapovat vybrané druhy hornin v Krkonošském národním parku s využitím laboratorní a obrazové spektroskopie. V rámci práce byl proveden terénní průzkum čtyř vybraných oblastí Krkonoš, kde byly nasbírány vzorky hornin, jejichž laboratorně naměřená spektra vstupovala do jednotlivých klasifikací. Vzorky byly určeny s pomocí geologů, do klasifikací několika metodami vstupovaly různé typy spekter (laboratorní, terénní, obrazová, smíšená spektra hornin a lišejníků). Výsledky byly vyhodnoceny na základě konzultace s geologem a na základě prostorového podílu pixelů vyklasifikovaných pod maskou geologických objektů sledovaných oblastí.

Jelikož jsou horniny v Krkonoších často porostlé lišejníky, byl zhodnocen vliv různé pokrývnosti lišejníků na výsledky klasifikací. Spektra hornin a lišejníků byla laboratorně smíšena v různém poměru a poté využita ke klasifikacím. Bylo zjištěno, že lišejníky mají skutečně vliv na přesnost klasifikace. Při vstupu laboratorních spekter se smíšenými spektry hornin a lišejníků došlo ve většině případů k nahrazení čistých hornin horninami smíšenými v různém poměru s lišejníky.

Dále byla vyhodnocena prostorová přesnost klasifikace – bylo zjištěno, že pokud do klasifikací vstupují spektra hornin smíšených s lišejníky, zvyšuje se prostorová přesnost klasifikací. Pokud hodnotíme jednotlivé použité metody klasifikace, lze říci, že nejvhodnějším klasifikátorem byl klasifikátor MESMA, který dosahuje nejpřesnějších výsledků jak z prostorového hlediska, tak i z hlediska přesnosti klasifikace jednotlivých hornin.

Důležitým cílem práce bylo také vytvoření unikátní spektrální knihovny pro sledovaná území v Krkonoších, která obsahuje přes 100 spektrálních křivek jak čistých hornin, tak hornin smíšených v různém poměru s určitými druhy lišejníků.

Pro klasifikace geologických objektů podobných oblastí, jaké byly klasifikovány v této práci, bych doporučila obecný postup klasifikace, který vyplývá z dosažených výsledků. Jako nejvhodnější klasifikační metody se jeví SID a MESMA. Z geologického hlediska ale vykazuje metoda MESMA oproti metodě SID přesnější výsledky. Tyto výsledky se dají zpřesnit použitím různých typů vstupních spekter – nejlepší výsledky byly prokázány za použití laboratorních spekter čistých hornin smíchaných se všemi typy lišejníků.

ZDROJE:

- ALBRECHTOVÁ, Jana a Barret N. ROCK. Dálkový průzkum krušnohorských lesů. Vesmír [online]. 2003, č. 6 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanek/dalkovy-pruzkum-krusnohorskych-lesu>
- AMICI, S. et. al.: Geological Classification of Etna volcano by Hyperspectral and Multispectral Satellite. In: *Second Annual Academic Hyperspectral Imaging Conference* [online]. 2011 [cit. 2013-08-08]. Dostupné z: http://www.strath.ac.uk/media/departments/eee/cesip/hsi/proceedings-of-hsi_2011.pdf
- APEX [online]. 2012 [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: <http://www.apex-esa.org/>
- BECHTEL, R., et. al.: Spectral properties of foliose and crustose lichens based on laboratory experiments. *Remote Sensing and Environment* [online]. 2002, č. 82, s. 389-396 [cit. 2013-08-08]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442570200055X>
- CHANG, W.-S. a C.-C. LIU. Application of Hyperion hyperspectral imagery on geological mapping in Central Mountain Range of Taiwan: preliminary results. [online]. 2005, [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2005/Papers/D2-P16.pdf>
- Czech geological survey: Sokolov site decription. Česká geologická služba: Dálkový průzkum Země [online]. 2012 [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/project619100/sokolov>
- Czech space. CSO+factsheets-Sentinel-web. [online]. 2006 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: <http://www.czechspace.cz/cs/system/files/CSO+factsheets-Sentinel-web.pdf>
- Česká geologická služba: Dálkový průzkum Země. Česká geologická služba [online]. 2012 [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/vav/regionalni-geologie/dpz>
- ČGS. *Geologická mapa 1 : 50 000* [online]. [cit. 2013-07-15]. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/geocr_25/
- DEMEK, Jaromír. *Geomorfologie českých zemí*. Vyd. 1. Praha: Nakl. ČSAV, 1965, 335 s.
- DOBROVOLNÝ, Petr. *DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ, DIGITÁLNÍ ZPRACOVÁNÍ OBRAZU*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 1998. ISBN 80-210-1812-7.

- EASTON, R. M. Lichens and Rocks: A Review. *Geoscience Canada* [online]. 1994, roč. 21, č. 2, s. 59-76 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z:
<http://journals.hil.unb.ca/index.php/GC/article/view/3831/4345>
- Envi Classic Tutorial: Spectral Angle Mapper (SAM) and Spectral Information Divergence (SID). *Exelis Tutorials* [online]. 2009 [cit. 2013-08-14]. Dostupné z:
http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/SAM_SID_Classification.pdf
- EO-1 a senzor Hyperion. Geografické informační systémy - ARCDATA PRAHA [online]. 2012 [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: <http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/geograficka-data/druzicova-data/druzice-a-skenery/eo-1-a-senzor-hyperion/>
- GIROUARD, G., et. al.: Validated Spectral Angle Mapper Algorithm for Geological Mapping: Comparative Study between Quickbird and Landsat-TM [online]. 2004, [cit. 2013-08-08]. Dostupné z:
<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/432.pdf>
- GLENN F.N. et. al. Hyperspectral data processing for repeat detection of small infestations of leafy spurge. *Remote Sensing of Environment*, New York: Elsevier Science Inc., 2005. 399–412 s.
- GOODWIN, N. – MERTON, R. N. – TURNER, R. (2005). Classifying Eucalyptus forests with high spatial and spectral resolution imagery: an investigation of individual species and vegetation communities. *Australian Journal of Botany*, Vol. 53, No. 4, 2005. 337-345 s.
- HUBBARD, B. a J. K. CROWLEY. Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2005, s. 173-186 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.is.cuni.cz/science/article/pii/S0034425705001781>
- CHALOUPSKÝ, Josef. *Geologie Krkonoš a Jizerských hor*. 1. vyd. Praha: Academia, 1989, 288 s.
- KACHLÍK, V. 2003. Geologický vývoj území České republiky, SURAO Praha, 65 str.
- KOLÁŘ, Jan. *Dálkový průzkum Země*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00517-5.
- KOPAČKOVÁ, Veronika, Stephane CHEVREL, BOURGUIGNON a Petr ROJÍK. Využití spektroradiometrických měření pro identifikaci kyselých zvětralinových substrátů – studie ze Sokolovské pánve. *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2008* [online].

- 2009, č. 1 [cit. 2012-03-22]. ISSN 0514-8057. Dostupné z
<http://www.geology.cz/zpravy/obsah/2008/2008-77.pdf>
- Krkonoše [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.hory-krkonose.cz/>
- Krkonoše [online]. 2008 [cit. 2012-09-11]. Dostupné z: <http://www.ergis.cz/krkonose/>
- KRUSE, F. A, et. al. Expert System-Based Mineral Mapping in Northern Death Valley, California/Nevada, Using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment* [online]. 1993, č. 44 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: http://www.hgimaging.com/PDF/Kruse_Xpert93_NGM_RSE.pdf
- KRUSE, Fred A. Mapping surface mineralogy using imaging spectrometry. *Geomorphology* [online]. 2012, č. 1, s. 41-56 [cit. 2012-09-06]. ISSN 0169-555X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X11001516>
- LUMME, J. H. Classification of vegetation and soil using imaging spectrometer data. [online]. 2004, [cit. 2013-08-08]. Dostupné z: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm7/papers/16.pdf>
- MÁLKOVÁ, Hana. Klasifikace land cover z hyperspektrálních dat v rekultivovaných oblastech Sokolovské hnědouhelné pánve. Praha: Univerzita Karlova v Praze, 2010. 70 s., 7 s.
- MATHER, Paul M. *Computer processing of remotely sensed images: an introduction*. 4th ed. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, c2011, xx, 434 str.
- MCHUGH, E., et. al.: Simplified Hyperspectral Imaging for Improved Geologic Mapping of Mine Slopes [online]. 2003, [cit. 2013-08-08]. Dostupné z: <http://stacks.cdc.gov/objectView!getDataStreamContent.action?pid=cdc:9439&dsid=DS1&mimeType=application/pdf>
- METELKA, Václav. Geological analysis of remote sensing data in the Gobi Altai region. Praha, 2005. Diplomová práce. Univerzita Karlova.
- PETRÁNEK, J. Geologická encyklopedie. *Česká geologická služba* [online]. 2007 [cit. 2013-08-08]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie>
- REES, W.G., et. al.: Reflectance spectra of subarctic lichens between 400 and 2400 nm. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2004, č. 3 [cit. 2013-06-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.is.cuni.cz/science/article/pii/S0034425704000070>
- RICHARDS, J. A., JIA, X., 2006. Remote sensing digital image analysis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, ISBN-13 978-540-25128-6..

- ROBERTS, D. A. *BEACON eSpace at Jet Propulsion Laboratory* [online]. 1996 [cit. 2013-08-14]. Dostupné z: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/20241/1/98-1135.pdf>
- ROLLIN, E. M., et. al. The influence of weathering and lichen cover on the reflectance spectra of granitic rocks. *Remote Sensing of Environment*. 1994, č. 50.
- SINGH, A. a S. MUKHERJEE. Hyperspectral remote sensing applied for hydrogeological mapping in a hard-rock terrain for water resource management. [online]. 2011, [cit. 2012-03-21]. ISSN 0277-786X. Dostupné z: http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=3&SID=W1KLO69NPPgM7K8ccnF&page=1&doc=8#output_options
- SMITH, R. B. (2012): *Introduction to Hyperspectral Imaging with TNTmips, MicroImages* [online]. 24 pp. [cit. 2012-03-01]. URL: <<http://www.microimages.com/getstart/pdf/hyprspec.pdf>>.
- Správa KRNAP* [online]. 2010 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.krnep.cz>
- VAN DER MEER, et. al.: Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. 2012, č. 14, s. 112-128 [cit. 2013-08-08]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243411001103>
- VALENT, T.: Dostupné spektrální knihovny a jejich využití v geologii. Bakalářská práce. Olomouc. UPO, Katedra geoinformatiky, 2007. 56 s.
- VITO. *APEX 2012 - September Campaign HyMountEcos data delivery report*. 2013.
- ZHANG, J., et. al.: Spectral unmixing of normalized reflectance data for the deconvolution of lichen and rock mixtures. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2005, č. 1 [cit. 2013-06-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.is.cuni.cz/science/article/pii/S0034425704003633>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výřezy zájmových oblastí

Příloha 2: Klasifikace laboratorních spekter v oblasti Vysokého kola metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 3: Klasifikace laboratorních a terénních spekter v oblasti Vysokého kola metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 4: Klasifikace obrazových spekter v oblasti Vysokého kola metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 5: Klasifikace obrazových spekter se smíšenými spektry hornin a zelených lišejníků v oblasti Vysokého kola metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 6: Klasifikace laboratorních spekter se smíšenými spektry hornin a zelených lišejníků v oblasti Vysokého kola metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 7: Klasifikace laboratorních spekter se smíšenými spektry hornin a všech lišejníků v oblasti Vysokého kola metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 8: Klasifikace laboratorních spekter v oblasti Harrachových kamenů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 9: Klasifikace obrazových spekter v oblasti Harrachových kamenů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 10: Klasifikace obrazových spekter se smíšenými spektry hornin a zelených lišejníků v oblasti Harrachových kamenů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 11: Klasifikace laboratorních spekter se smíšenými spektry hornin a zelených lišejníků v oblasti Harrachových kamenů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 12: Klasifikace laboratorních spekter se smíšenými spektry hornin a všech lišejníků v oblasti Harrachových kamenů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 13: Klasifikace laboratorních spekter v oblasti Kozích hřbetů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 14: Klasifikace obrazových spekter v oblasti Kozích hřbetů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 15: Klasifikace obrazových spekter se smíšenými spektry hornin a zelených lišejníků v oblasti Kozích hřbetů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 16: Klasifikace laboratorních spekter se smíšenými spektry hornin a zelených lišejníků v oblasti Kozích hřbetů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 17: Klasifikace laboratorních spekter se smíšenými spektry hornin a všech lišejníků v oblasti Kozích hřbetů metodami SAM, MESMA, SID a LSU

Příloha 18: CD s textem práce a spektrální knihovnou